



Joana Nobre Soares Baracinha
Licenciatura em Ciências de Engenharia Mecânica

Caracterização da geometria do dano induzido na furação de compósitos reforçados com fibra de carbono

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado,
Prof. Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Arguente: Prof. Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado
Vogal: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2016

**Caracterização da geometria do dano induzido na furação de compósitos reforçados
com fibra de carbono**

Copyright © 2016 Joana Nobre Soares Baracinha

Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Ao meu pai

Agradecimentos

A todos que de forma direta ou indireta ajudaram para que fosse possível a realização deste trabalho o meu muito obrigado, em especial:

À professora Carla Machado, pela oportunidade de realizar esta tese desafiante, por toda a ajuda e tempo disponibilizado durante toda a sua elaboração, pelo apoio dado ao longo destes anos e pela amizade demonstrada.

Ao professor Jorge Pamies Teixeira, pelo apoio e motivação ao longo do meu percurso, e pela força e dedicação concedidas nesta fase tão decisiva da minha vida.

Aos meus pais, sem eles seria impossível alcançar todos estes objetivos. Em especial ao meu pai, por todo o apoio e afeto demonstrado, por sempre ter acreditado em mim, por sempre me ter apoiado e por ter permitido a concretização do meu sonho. Apesar de todas as adversidades ultrapassadas, o seu apoio foi fundamental para conseguir ter chegado até aqui.

Ao meu namorado e confidente Fábio Duarte, o seu apoio tanto a nível psicológico como emocional foi muito importante para mim. Foi a pessoa que mais me encorajou para continuar sempre a lutar, que sempre me motivou e que esteve a meu lado sempre que precisei. Agradeço também aos seus pais e irmão, por todo o afeto e por todo o empenho demonstrado ao longo destes tempos.

Aos meus amigos e colegas Marina Alves e Pedro Mangualde, nestes últimos tempos apoiaram-me e ajudaram me sempre que necessário. Um agradecimento especial ao Valdemar Duarte, pelo apoio, pela ajuda e pela companhia durante a elaboração da minha dissertação.

À minha fiel amiga Joana Medeiros, que sempre me acompanhou desde que entrámos na faculdade, que sempre me animou, que sempre me encorajou e que esteve a meu lado todos estes anos. Ao André Gonçalves, por ter estado sempre a meu lado desde que entrei no curso, por me ter acompanhado nesta longa jornada, pela sua amizade, disponibilidade e companheirismo.

Aos meus amigos de longa data, Ivo Rodrigues, André Moleiro e Eleonora Rodrigues, que me acompanharam desde o secundário. Agradeço todo o apoio e toda a motivação prestada, apesar de um obrigado não ser suficiente para demonstrar toda a minha gratidão.

A utilização de materiais compósitos a nível industrial, nomeadamente materiais reforçados com fibra de carbono, tem vindo a aumentar cada vez mais devido às suas características únicas, como o baixo peso e a grande resistência. Devido à necessidade de estabelecer ligações ou reparações estruturais, recorre-se com frequência à maquinagem destes materiais, mais concretamente à furação. O dano mais significativo proveniente deste processo é a delaminação. Têm vindo a ser realizadas diversas investigações acerca deste tema. No entanto, existe a falta de uma padronização relativamente à quantificação deste defeito e qual a sua influência na vida útil dos componentes.

Este trabalho tem como objetivo caracterizar o dano proveniente da furação a alta velocidade em componentes de material compósito de matriz epóxida, reforçados com fibras de carbono. Desenvolveu-se uma ferramenta computacional, que permite a caracterização do dano em termos dimensionais e geométricos. A metodologia adotada baseia-se nos conceitos da teoria do princípio da inércia e através dos valores e vetores próprios da imagem binarizada, resultante do processamento da obtida por radiografia digital, foi possível estimar a direção preferencial do dano.

O objetivo deste trabalho foi concretizado na medida em que, aplicando a ferramenta computacional desenvolvida, é possível caracterizar efetivamente quer em termos dimensionais, quer geométricos, o dano induzido pela operação de furação em componentes produzidos em materiais compósitos, constituindo assim um contributo importante para a deteção deste tipo de danos.

Palavras-chave: Caracterização de defeitos, END, Raio-X, Processamento de imagem, *Threshold*

The industrial use of composite materials, particularly carbon fibre reinforced composite materials, has been increasing due to its unique characteristics, such as low weight and high strength. To make structural repairs and to establish the joining of the components, the drilling process is often used. The most significant damage that occurs due to this process is the delamination. Several investigations have been conducted about this topic. However, there is a lack of standardization regarding the quantification of this defect and what is its influence on the life service of the components.

The aim of this work is to characterize the damage induced by high speed drilling in carbon fibre reinforced composites components. A computational tool was developed and it allows the characterization of the damage in dimensional and geometrical terms. The adopted methodology is based on the concepts of the theory of inertia principle and through the eigenvalues and eigenvectors of the binarized image, resulting from the image processing and obtained by digital radiography, it was possible to estimate the principal direction of the damage.

The aim of this work was achieved since applying the developed computational tool, it is possible to characterize effectively the damage induced by the drilling operation in components made by composite materials, in both terms, dimensional and geometrical, thus constituting an important contribution to detect this type of damage.

Keywords: Damage characterization, NDT, X-ray, Image processing, Threshold

1	Enquadramento, Motivação e Objetivos	1
1.1	Introdução.....	1
1.2	Motivação e Objetivo	2
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	Revisão da Literatura	5
2.1	Materiais	5
2.2	Processos de Maquinagem	6
2.3	Delaminação.....	9
2.4	Ensaaios não Destrutivos.....	13
2.5	Processamento de Imagem	15
2.6	Comentários Finais.....	18
3	Metodologias e Procedimento Experimental	19
3.1	Fundamentos da Metodologia.....	19
3.1.1	1ª Abordagem.....	19
3.1.2	2ª Abordagem.....	20
3.1.3	3ª Abordagem.....	22
3.2	Abordagem Proposta	25
3.3	Procedimento Experimental	27
3.3.1	Material e Equipamento Utilizado.....	27
3.3.2	Radiografia Digital	29
3.4	Metodologia Proposta e Desenvolvimento em <i>Matlab</i>	29
4	Apresentação e Discussão de Resultados	33
5	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	41
5.1	Conclusões.....	41
5.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	42
	Anexo A	45
	Anexo B	47
	Anexo C	49

Índice de Figuras

Figura 1.1 - <i>Boeing 787 Dreamliner</i>	2
Figura 2.1 – Orientação das fibras	6
Figura 2.2 – Geometrias de ferramentas utilizadas na furação de materiais compósitos	7
Figura 2.3 – Alguns defeitos típicos dos materiais compósitos	9
Figura 2.4 – Delaminação: a) À entrada ; b) À saída	10
Figura 2.5 – Caracterização do dano segundo <i>Chen</i>	11
Figura 2.6 – Caracterização do dano segundo <i>Davim</i>	11
Figura 2.7 – Caracterização do dano segundo <i>Silva</i>	12
Figura 2.8 – Esquema de funcionamento da radiografia convencional	14
Figura 3.1 – Definição do diâmetro de Feret	20
Figura 3.2 – Detecção de veículos em vídeo aéreo	21
Figura 3.3 – Exemplos de transformações utilizadas	22
Figura 3.4 – Diferença entre uma má (esquerda) e uma boa (direita) selecção dos pontos críticos	23
Figura 3.5 – Segmentação invariante com a posição	24
Figura 3.6 – (a) Momento de inércia ; (b) Momento polar de inércia	25
Figura 3.7 – Imagem binarizada após aplicação do <i>threshold</i>	26
Figura 3.8 – Imagem binarizada e respetiva matriz	26
Figura 3.9 – Montagem experimental	28
Figura 3.10 – Equipamento de radiografia digital	29
Figura 3.11 – Passos 1 e 2 da metodologia	31
Figura 3.12 - Resultado final obtido	31
Figura 4.1 – Teste de validação 1	34
Figura 4.2 – Teste de validação 2	34
Figura 4.3 – Teste de validação 3	35
Figura 4.4 – Teste de validação 4	35
Figura 4.5 – Ensaio A3_V20 ($F_d = 1.664$)	36
Figura 4.6 – Ensaio A1_V6 ($F_d = 1.451$)	37
Figura 4.7 – Ensaio A3_V21 ($F_d = 1.627$)	37
Figura 4.8 – Análise da imagem A1_V1 e da sua respetiva matriz	38
Figura 4.9 – Ensaio A1_V1 após o ajuste da matriz	39
Figura 4.10 – Ensaio A1_V2 antes de ajustar a matriz (esquerda) e após o ajuste (direita)	39
Figura 4.11 – (a) Ensaio A4_V1, com $F_d = 1.271$; (b) Ensaio A4_V2, com $F_d = 1.222$; (c) Ensaio A4_V3, com $F_d = 1.305$	40

A nomenclatura utilizada ao longo deste trabalho segue-se acompanhada dos respectivos significados. Contudo estes significados podem-se obter na lista abaixo apresentada, facilitando assim a sua consulta. Esta encontra-se dividida em duas partes: Símbolos e Siglas.

Símbolos

F_d	Fator de delaminação
F_{da}	Fator de delaminação ajustado
D_{max}	Diâmetro máximo delaminado (mm)
D_0	Diâmetro do furo (mm)
A_0	Área nominal (mm ²)
A_d	Área do dano (mm ²)
J_0	Momento polar de inércia
I_x	Momento de inércia segundo o eixo x
I_y	Momento de inércia segundo o eixo y
P_{xy}	Produto de inércia

Siglas

END	Ensaio não destrutivo
CFRP	<i>Carbon fibre reinforced polymer</i>
GFRP	<i>Glass fibre reinforced polymer</i>

1 Enquadramento, Motivação e Objetivos

1.1 Introdução

Na área da fabricação de produtos, a tecnologia tem vindo a evoluir através de diversos estudos e inovações no que diz respeito quer aos processos, quer aos materiais utilizados. Desta forma, as novas exigências implicam a investigação da combinação de diferentes propriedades que, não sendo satisfeitas pelos materiais mais conhecidos, nomeadamente metálicos, cerâmicos e poliméricos, conduzem à necessidade do desenvolvimento de novos materiais. Os compósitos são um exemplo da combinação de diferentes constituintes, possuindo vantagens relativamente aos materiais tradicionais, sendo de realçar a elevada rigidez e resistência mecânica e o baixo peso específico. A utilização de compósitos a nível industrial tem vindo cada vez mais a ser solicitada devido a estas características. Este material é constituído por dois ou mais materiais diferentes, designados por matriz e reforço. A matriz permite que o compósito apresente uma forma estável, assegura uma distribuição eficiente da carga pelas fibras e possibilita ainda a proteção das superfícies. Existem diversos critérios para caracterizar este tipo de materiais, sendo os mais relevantes o tipo de matriz, polimérica, metálica, cerâmica ou cimentosa, e o tipo de fibras de reforço, carbono, vidro ou aramida [1].

No caso dos materiais compósitos de alto desempenho, utilizados principalmente nas indústrias de alto valor acrescentado, os mais habituais são os materiais compósitos, de matriz epóxida, reforçados com fibras de carbono (CFRP).

A utilização deste tipo de materiais remonta a 1500 A.C, onde egípcios e mesopotâmios misturavam lama e palha para a construção de edifícios. Até serem desenvolvidos os plásticos, a existência destes constituintes era nula, sendo então utilizadas resinas naturais derivadas de plantas ou de animais, como cola [2]. Atualmente, a utilização destes materiais apresenta um leque bastante alargado, verificando-se assim a sua existência em áreas de aplicação distintas e nem sempre de grande evidência, como por exemplo artigos desportivos, componentes elétricos e eletrónicos. Naturalmente, as grandes indústrias como a indústria automóvel, aeronáutica, espacial e de defesa, também se servem destes materiais, dada a sua elevada exigência e visibilidade tecnológica [1]. A título de exemplo, considere-se o avião de transporte *Boeing 787*. Cerca de 50% da constituição do *Boeing 787* é feita em compósitos (Figura 1.1), sendo a sua fuselagem produzida integralmente deste material. Esta composição permite assim ter uma estrutura mais leve e simples, aumentando a eficiência do avião e permitindo uma poupança significativa em gastos com combustível. Uma vez que fenómenos como fadiga ou corrosão são menos habituais do que nos materiais tradicionais, a utilização de compósitos é bastante económica, aumentando a produtividade, devido à reduzida periodicidade das manutenções. Uma grande vantagem é que estes constituintes resistem bem a impactos e permitem uma boa

inspeção visual. Os compósitos mais utilizados neste avião são as fibras de carbono, no entanto, também contém fibra de vidro e a mistura de ambos [3].



Figura 1.1 - Boeing 787 Dreamliner [3]

Apesar destes materiais serem produzidos na forma final ou quase final, existe frequentemente a necessidade de realizar operações de maquinagem. A furação é o processo mais utilizado, devido à necessidade de estabelecer ligações mecânicas. A realização destas operações conduz a defeitos, sendo os mais comuns a rotura e fissura da fibra/matriz, arrancamento das fibras, degradação térmica e delaminação [1,4]. Visto que a delaminação é o defeito mais significativo, este será objeto de estudo desta dissertação.

Recorre-se com frequência à inspeção do material após a sua maquinagem. Este controlo é crucial quanto à utilização de um determinado componente. Assim, recorre-se a ensaios não destrutivos (END), sendo os mais utilizados nos materiais compósitos reforçados com fibra de carbono a radiografia e os ultrassons por permitirem a avaliação da extensão do dano. A análise realizada através deste tipo de END carece de uma posterior avaliação com recurso a processamento de imagem que envolve a sua segmentação realizada através de diferentes algoritmos ou níveis de *threshold*. O objetivo consiste na medição das variáveis necessárias ao cálculo do fator de delaminação, que é actualmente a quantificação do dano utilizada. No entanto, não existe nenhuma metodologia que permita a comparação dos resultados, quando obtidos por diferentes investigadores [5].

1.2 Motivação e Objetivo

A motivação que conduziu à realização deste trabalho surgiu a partir da investigação que tem vindo a ser desenvolvida, no Núcleo de Tecnologia Mecânica da FCT-UNL, na vertente da análise do dano induzido pela operação de furação a alta velocidade de materiais compósitos reforçados com fibras de carbono. Nesta linha de investigação foram já desenvolvidos trabalhos referentes ao estudo da influência dos parâmetros de corte na extensão do dano com o objetivo da sua

minimização e foi pesquisada a influência do dano de delaminação sobre o comportamento em fadiga deste tipo de material. Desenvolveu-se ainda uma nova metodologia de processamento de imagem, associada a radiografia digital, capaz de quantificar o dano de furação em materiais compósitos.

A partir da pesquisa bibliográfica efetuada verificou-se a inexistência de padronização no que diz respeito à quantificação do dano. A forma clássica é através do fator de delaminação proposto por *Chen* [6] que depende exclusivamente do diâmetro máximo que circunscreve o dano e do diâmetro nominal do furo. Apesar de ser o mais utilizado, as suas limitações têm sido constatadas pelo que vários autores têm apresentado propostas de métodos alternativos. Por outro lado, na literatura mais recente consultada, observa-se a constatação de que a geometria do dano é de grande influência mas ainda não existe uma metodologia generalizada para a quantificar, nem são apresentados resultados experimentais da sua influência no comportamento dos componentes. Adicionalmente, e com base no trabalho de *Silva* [7] que concluiu que, em furos com o mesmo fator de delaminação, a direção preferencial do dano influencia a vida à fadiga dos componentes, corporizou-se a motivação de criar uma metodologia para não só quantificar, mas caracterizar completamente o dano induzido pela furação.

Assim, o objetivo deste trabalho de investigação é caracterizar, de forma efetiva, o dano provocado pela operação de furação a alta velocidade em componentes de material compósito de matriz epóxida, reforçados com fibras de carbono. Para concretizar este objetivo, é necessário o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que, com base numa metodologia abrangente, permita caracterizar o dano quer em termos dimensionais, quer geométricos, cobrindo os seguintes aspetos:

- Quantificação do dano através do cálculo do fator de delaminação clássico;
- Caracterização da geometria e direção preferencial do dano.

Numa vertente industrial, esta ferramenta terá como mais-valia uma rápida avaliação dos componentes furados, uma vez que o único *input* será a imagem proveniente da técnica de END selecionada.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente documento apresenta-se dividido em quatro partes:

Capítulo 1: Neste capítulo é feita uma breve introdução, expondo o tema a abordar e os diversos conteúdos relacionados com o mesmo. É também fundamentada a motivação que conduziu à escolha deste tema, bem como o objetivo da dissertação. Procede-se ainda à apresentação da estrutura desta dissertação.

Capítulo 2: Este capítulo apresenta a revisão da literatura, onde serão abordados os temas de interesse para o trabalho em questão. Irão ser abordados os conceitos fundamentais, nomeadamente no que diz respeito ao material (CFRP), aos processos de maquinaria,

ênfatizando o processo de furação, às ferramentas utilizadas, aos ensaios não destrutivos e às técnicas de processamento de imagem.

Capítulo 3: O objetivo principal deste capítulo é dar a conhecer as diferentes abordagens consideradas no decorrer desta dissertação, bem como o procedimento, nomeadamente quanto aos materiais e métodos, e os fundamentos do programa criado.

Capítulo 4: No capítulo 4 é feita a apresentação e discussão dos resultados relativos à ferramenta computacional desenvolvida.

Capítulo 5: Finalmente, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões relativas ao trabalho realizado e sugestões para possíveis trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

2.1 Materiais

Os materiais compósitos do tipo fibroso destacam-se dos restantes devido à sua elevada resistência, sendo mais fortes. As fibras são leves, rígidas e resistentes, o que confere ao material sob a forma de laminado determinadas características, nomeadamente a rigidez e a força [6,8].

Existem diversos tipos de reforços, nomeadamente fibras de vidro, fibras de carbono, fibras aramídicas e fibras de boro. O presente trabalho irá somente incidir nas fibras de carbono, sendo os materiais poliméricos reforçados com fibra de carbono designados por CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*). Estes são bastante utilizados na indústria devido às suas elevadas propriedades mecânicas [1,9].

As fibras de carbono podem ser divididas em duas distintas: fibras de carbono com percentagens de carbono entre 80 e 95%, e as fibras de grafite, tendo uma percentagem máxima de carbono de 99%. Estes tipos de fibra são aplicadas em compósitos de elevado desempenho mecânico, mais concretamente para a indústria aeronáutica e espacial. A sua produção passa por diversos processos, nomeadamente, uma oxidação controlada, carbonização e grafitação dos precursores orgânicos ricos em carbono, que já estão em forma de fibra e foram obtidos através de extrusão. Existem três tipos de precursores orgânicos: a celulose, o poliacrilonitrilo (PAN) e o alcatrão (*pitch*). Atualmente, o mais utilizado é o poliacrilonitrilo, pois apresenta melhores propriedades mecânicas e é menos dispendioso. As fibras de carbono podem ainda ser classificadas com base na sua resistência mecânica, segundo as seguintes designações: *ultra high modulus* (UHM), *high modulus* (HM), *intermediate modulus* (IM) e *high strength* (HS) [1,10].

Existem várias formas de produção de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono, sendo, na indústria aeronáutica, maioritariamente utilizados os tecidos pré-impregnados, que podem ser feitos segundo diversos padrões e tramas diferentes. Estes poderão ser unidirecionais (*UD-ply*), onde se tem máxima força e rigidez ao longo da orientação da fibra, neste caso 0°. Estas propriedades são bastante reduzidas na direção perpendicular. Existem ainda os bidirecionais (*woven-ply*), em que qualquer que seja a direção, as suas propriedades são praticamente sempre máximas [6,8]. A Figura 2.1 permite uma melhor compreensão do que foi anteriormente referido.

Como já foi referido anteriormente, os materiais poliméricos reforçados com fibra de carbono são comumente apresentados sob a forma de laminados. Esta forma consiste em várias camadas, nas quais as fibras estão todas alinhadas na mesma direção. Desta forma, a camada comporta-se como um bloco elementar, sendo um laminado normalmente constituído por várias camadas diferentemente orientadas. Por outro lado, a camada pode ser considerada um compósito unidirecional.

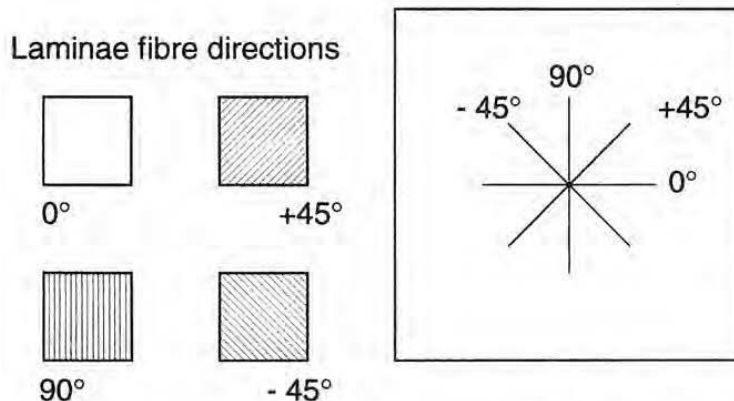


Figura 2.1 – Orientação das fibras (Adaptado de [11])

Existem diversos domínios de análise, consoante a escala utilizada. A *Micromecânica* consiste num domínio que contém modelos capazes de prever as propriedades da camada em função do teor e das propriedades dos constituintes. Existe ainda a *Macromecânica*, em que a camada unidirecionada dos compósitos em fibras contínuas é tratada como um sólido homogêneo [1].

2.2 Processos de Maquinagem

A utilização de compósitos tem vindo cada vez mais a verificar-se, sendo assim importante a sua maquinagem. Comparativamente com ligas e metais, estes apresentam uma estrutura anisotrópica e não homogênea, sendo previamente preparados sob a forma de laminados [9]. Devido a estas diferenças, os mecanismos dos processos de maquinagem diferem dos relativos aos metais, pelo que estão a ser alvo de novos desenvolvimentos para evitar defeitos induzidos.

Os processos de maquinagem tradicionais, nomeadamente o torneamento, a fresagem e a furação são utilizados neste tipo de materiais. No entanto é possível utilizar outros processos, destacando-se três: corte com serra, corte com jato de água e corte com laser. Devido à necessidade de estabelecer ligações ou reparações estruturais, recorre-se frequentemente ao processo de furação. A qualidade, desempenho e precisão das juntas aparafusadas depende da qualidade dos furos, afetando também as forças nessas mesmas juntas [1,9]. Para a realização de furos, pode-se igualmente recorrer à utilização de laser, de jato de água e também de eletroerosão. Atualmente utiliza-se com bastante frequência a furação a alta velocidade, sendo este um aspeto bastante importante e avançado para a tecnologia de fabrico, permitindo atingir uma maior produtividade e poupando gastos de fabrico. Esta tecnologia é bastante promissora permitindo a redução das forças de corte, taxas de remoção superiores e, como consequência, menor consumo energético. O investimento inicial apresenta valores bastante elevados, porém a relação custo/benefício é compensatória [12,13].

O foco do presente trabalho consiste na furação de materiais compósitos, sendo estes materiais poliméricos reforçados com fibra de carbono. Como tal, serão somente abordadas as ferramentas que permitem a furação dos mesmos. É desde já importante referir que as ferramentas deverão ser constituídas por materiais com elevada resistência ao desgaste e à abrasão, devido à resistência dos reforços, que são altamente abrasivos [14]. Estas características conduziram ao desenvolvimento de novas ferramentas de corte e adaptação das existentes, com o intuito de reduzir os danos mecânicos e térmicos, permitindo assim o bom funcionamento das mesmas [7].

A força axial depende fortemente da ferramenta de corte, ou seja, existe uma condicionante à sua escolha. A geometria de ferramenta mais utilizada industrialmente na furação de laminados epóxicos é a broca helicoidal, no entanto, outras ferramentas foram desenvolvidas com o intuito de melhorar esta operação [9,10]. A Figura 2.2 demonstra estas ferramentas.

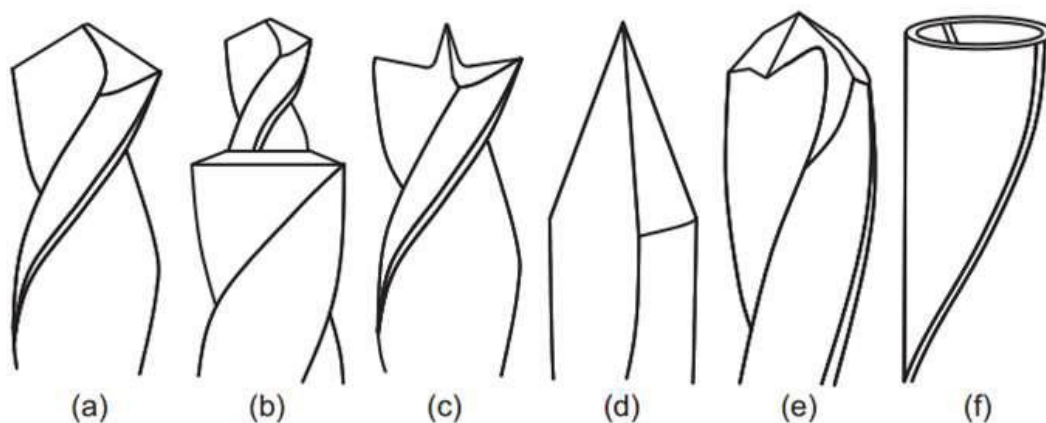


Figura 2.2 – Geometrias de ferramentas utilizadas na furação de materiais compósitos:
(a) Helicoidal; (b) Escalonada; (c) Em W; (d) Espada; (f) Multifacetada; (e) “core drill”
[13]

Estas ferramentas podem operar com avanços mais elevados, havendo uma menor ocorrência de danos comparativamente à geometria helicoidal [12]. No entanto, já se verificou o bom desempenho da geometria desta, relativamente às que foram desenvolvidas somente para compósitos. É assim possível obter menos dano, perante a utilização de velocidades de rotação e avanço elevadas [10,12].

Através das experiências realizadas por *Chen* [6], foi possível concluir que a temperatura de corte constitui um fator muito importante, afetando o desgaste e a vida útil da ferramenta. Foi ainda possível verificar que sendo a força axial uma das maiores causas para a ocorrência de delaminação, deve-se escolher um ângulo de ponta reduzido com o intuito de diminuir esta força. Este autor comparou metais com CFRP, devido ao vasto conhecimento existente relativamente aos primeiros. Verificou-se que o efeito da velocidade de corte no endurecimento do material é eliminado através do seu amaciamento, devido à temperatura de corte crescente. Este fenómeno poderá também se verificar em materiais compósitos. Na furação de CFRP não se forma uma aresta postiça, no entanto, o efeito da velocidade de corte nas forças de corte é insignificante.

Com o intuito de melhorar a qualidade do furo à saída, o avanço terá que ser diminuído ao longo da furação, para que apresente um valor mais reduzido na zona desejada. É importante referir que se o avanço for demasiado reduzido, o tempo de corte aumenta, ocorrendo assim o fenómeno de delaminação derivado da vibração, no caso da furação a alta velocidade. Quanto maior for o avanço, menor será o tempo de corte e, conseqüentemente, menor será o aumento da temperatura na superfície de flanco. O aumento de temperatura na superfície de flanco é mais reduzido na furação de CFRP, comparativamente à furação de materiais metálicos. Este fenómeno dá-se devido à reduzida quantidade de calor produzido durante a deformação plástica, pois estes compósitos são frágeis, sendo encontradas aparas em pó, formadas durante o processo de furação. Através dos resultados experimentais obtidos, foi possível concluir que a temperatura da superfície de flanco de uma broca aumenta com o aumento da velocidade de corte e com a diminuição do avanço.

Davim et al. [8] realizaram experiências que permitiram concluir que a área do dano aumenta com o aumento da velocidade de corte e que o avanço afeta mais drasticamente a ocorrência de delaminação, comparativamente à velocidade de corte.

Um estudo realizado por *Krishnaraj et al.* [15] consistiu na furação a alta velocidade de um compósito reforçado com fibra de vidro em placas com 2 mm de espessura, tendo sido realizados um total de 150 furos. Os parâmetros de maquinagem consistiram numa velocidade de rotação entre os 12 000 e 20 000 rpm e avanço entre 0,01 e 0,3 mm/rev. A ferramenta utilizada era de 5 mm de diâmetro e 118° de ângulo de ponta. Foi possível concluir que o avanço tem uma grande influência na força axial, na delaminação à saída e no diâmetro do furo. A velocidade de rotação e o avanço não influenciaram a ocorrência de delaminação à entrada, não havendo delaminação considerada como significativa até aos 30 furos. Através da investigação realizada foi possível concluir que os parâmetros ótimos para este tipo de furação são 12 000 rpm e 0,137 mm/rev. Estes autores caracterizaram a qualidade do furo apenas através da medição de rugosidade, não identificando o dano nem qualitativa nem quantitativamente. Esta foi das formas de caracterização encontradas mais frequentemente na literatura, pelo que se apresenta apenas como exemplo.

Durão et al. [16] realizaram um estudo com o intuito de comparar o desempenho de ferramentas de três diferentes geometrias quando combinadas com três diferentes avanços. O material utilizado foi um laminado unidirecional de matriz epóxida com reforço de carbono. Uma das brocas utilizadas foi a helicoidal, com dois materiais distintos. Verificaram que quanto maior o avanço, maior a delaminação. Logo, este deverá ser tão conservativo quanto possível, com o intuito de evitar a ocorrência de delaminação muito extensa em torno do furo. Observou-se uma maior circularidade na zona danificada, muito próxima de um círculo, para furos realizados com brocas de aço rápido (HSS). Já para as brocas de metal duro (WC), não existe influência da geometria da ferramenta quanto à circularidade e extensão do dano. A delaminação foi avaliada através de radiografia digital e cada imagem foi processada computacionalmente para identificar e caracterizar as regiões de interesse, medindo os diâmetros e as áreas correspondentes ao dano. Neste trabalho, os autores identificaram a limitação do fator de delaminação proposto por *Chen*,

identificando a importância da forma geométrica de distribuição do dano. No entanto, não quantificaram nem caracterizaram a mesma.

Durão et al. [17] realizaram um estudo através da furação de CFRP sob a forma de laminados. O objetivo foi comparar o desempenho de uma ferramenta, dois diferentes materiais e três diferentes geometrias. Como o objeto de estudo tem-se a força máxima axial aplicável, a extensão da delaminação e a sua força mecânica. Para efeitos de teste foram utilizados três avanços e três velocidades de corte. Comparando a ferramenta de metal duro com a diamantada, tem-se que a primeira é menos dispendiosa, provoca menos dano e é mais económica para a furação de pequenas séries. Através da análise ANOVA, foi possível observar que o avanço é o fator mais significativo para a redução da delaminação, seguindo-se a geometria da ferramenta. Novamente, a avaliação da delaminação foi realizada por radiografia digital, seguindo-se o processamento computacional para identificar e caracterizar as regiões de interesse, medindo os diâmetros e as áreas correspondentes ao dano.

2.3 Delaminação

Quando se procede à maquinagem deste tipo de materiais, a existência de defeitos é sempre inevitável. Os mais comuns na furação de compósitos consistem na rutura e fissura da fibra/matriz, arrancamento das fibras, degradação térmica e delaminação [1,4]. É importante referir que o defeito mais significativo é a delaminação, sendo esse abordado mais detalhadamente neste documento. Na Figura 2.3 é possível verificar quais os defeitos mais comuns neste tipo de material.

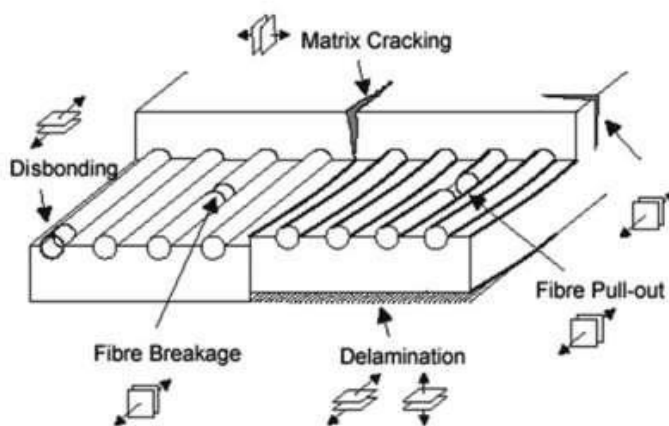


Figura 2.3 – Alguns defeitos típicos dos materiais compósitos [18]

A delaminação consiste num fator limitativo à utilização de compósitos. A operação de furação provoca este defeito, especialmente à entrada e à saída da broca. À entrada, consiste num arrancamento das camadas superiores, a partir do momento em que a broca corta a primeira camada. À saída, a broca funciona como punção, provocando delaminações nas camadas inferiores [1,7]. A Figura 2.4 permite uma melhor visualização deste tipo de dano.

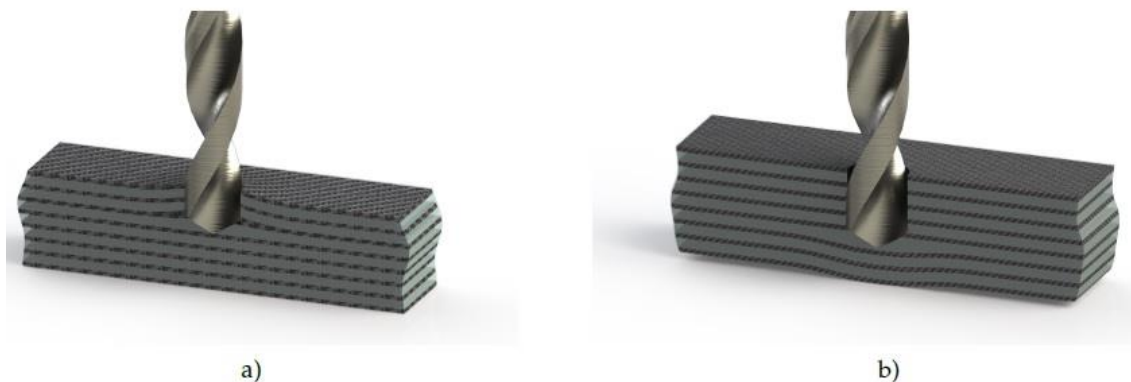


Figura 2.4 – Delaminação: a) À entrada ; b) À saída (Adaptado de [19])

Existem variáveis importantes que influenciam este defeito. Entre elas tem-se a velocidade de avanço, velocidade de corte, geometria da broca, desgaste da ferramenta, o tipo de material da peça e da ferramenta e o respetivo ângulo de ponta. Sabe-se que quanto maior o avanço, menor o tempo de furação. No entanto, a delaminação poderá ocorrer com maior risco. Sabe-se ainda que o aumento da velocidade de corte irá certamente aumentar a taxa de produção, permitindo ainda uma redução das forças de corte. Isto poderá ser vantajoso pois a ocorrência de delaminação poderá não se verificar. O desgaste da ferramenta também está relacionado, pois a força necessária para cortar aumenta à medida que o desgaste aumenta. A geometria da ferramenta é um fator importante para diminuir este defeito, nomeadamente quanto aos gumes de corte, havendo um número ótimo que fará aumentar o contato entre a ferramenta e o material. Juntamente com um ângulo de ponta de 118° e um ângulo de ataque pequeno, é então possível reduzir a sua ocorrência. A tendência para a delaminação poderá diminuir também com o aumento da velocidade de corte e com a combinação de uma velocidade de rotação baixa e o ângulo de ponta, quando considerada furação a alta velocidade [6,7,8,15].

Chen [6] propôs que o fator de delaminação (F_d) depende do diâmetro máximo obtido no dano e do diâmetro nominal do furo, sendo dado pela equação 2.1 e ilustrado na Figura 2.5.

$$F_d = \frac{D_{m\acute{a}x}}{D_0} \quad 2.1$$

$D_{m\acute{a}x}$ é o diâmetro máximo delaminado e D_0 é o diâmetro nominal do furo. *Chen* estudou a variação deste fator na furação de compósitos unidirecionais reforçados com fibra de carbono, e concluiu que havia uma relação aproximadamente linear entre a força axial durante o corte e o valor do fator de delaminação. Verificou ainda que o fator de delaminação poderá ser utilizado como uma base teórica, com o intuito de detetar o início do fenómeno de delaminação enquanto se realizam as operações de furação.

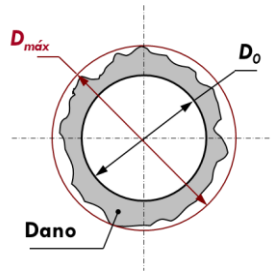


Figura 2.5 – Caracterização do dano segundo *Chen* [6]

Como esta fórmula apresenta limitações quando a área do círculo que enquadra o dano for muito maior que o dano, *Davim et al.* [8] acrescentaram outra perspectiva. O fator de delaminação passaria a ter outro tipo de representação, sendo denominado por fator de delaminação ajustado. Estes autores defendem que o fator de delaminação convencional é satisfatório quando o defeito apresenta um padrão regular, como se verifica nos compósitos reforçados com fibra de vidro (GFRP). No entanto, quando os CFRP são maquinados, a delaminação apresenta um padrão irregular, dando-se a rutura das fibras que provocam a fissura do material, tanto à entrada como à saída do furo. Neste caso, o fator de delaminação clássico não é apropriado devido à distribuição do dano, que não consiste numa representação conveniente da sua magnitude. Assim, estes autores criaram o fator de delaminação ajustado (F_{da}), em que a primeira parte da equação consiste no fator clássico, ou seja, representa o tamanho da fissura, e a segunda parte representa a contribuição do dano em área (equação 2.2).

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{máx} - A_0)} (F_d^2 - F_d) \quad 2.2$$

Nesta equação A_d corresponde à área do dano, $A_{máx}$ à área correspondente ao $D_{máx}$, A_0 à área nominal do furo e F_d é o fator de delaminação segundo o critério apresentado anteriormente. A Figura 2.6 ilustra o fator de delaminação ajustado proposto.

No entanto, o fator de delaminação ajustado não apresenta muitas vantagens quando comparado com o de *Chen*, pois tem-se uma equação mais complexa e, visualmente, os gráficos obtidos consistem somente num *offset* da equação do fator de delaminação clássico. Assim, as retas obtidas por ambos contêm, aproximadamente, o mesmo declive.

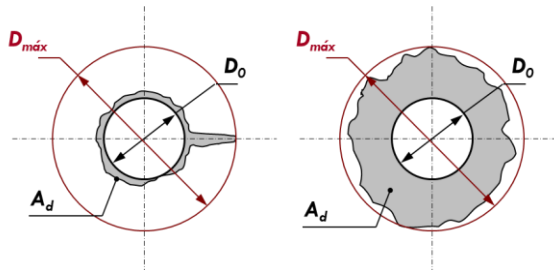


Figura 2.6 – Caracterização do dano segundo *Davim* [8]

Silva [4] verificou que o centro do furo pode ser diferente do centro do dano. No trabalho realizado por este autor desenvolveu-se uma nova abordagem para quantificar o dano que ocorre após a furação, que consiste no fator de delaminação mínimo (F_{dmin}). O objetivo consiste na comparação do dano após a furação, quando diferentes metodologias são utilizadas. A quantificação da delaminação compreende a avaliação da menor área que contém todo o dano resultante do processo de furação. A ênfase desta metodologia é caracterizar a forma do furo através de um valor quantificado associado exclusivamente ao dano. A concentricidade entre o furo e a área envolvente do dano é eliminada e o centro da zona envolvente coincide com o centro da zona afetada. A relação entre a área afetada e a quantificação da área do dano apresentou um melhor resultado utilizando este fator desde que o círculo que inclui a área do defeito seja menor (Figura 2.7).

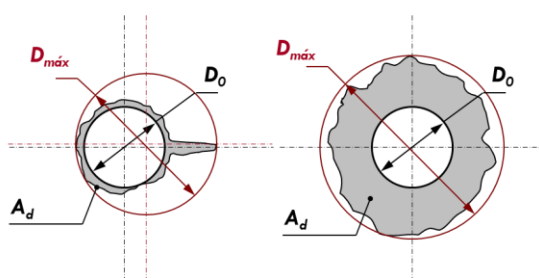


Figura 2.7 – Caracterização do dano segundo *Silva* [4]

Será de salientar que em todos estes trabalhos de investigação a metodologia de quantificação do dano se baseou nos mesmos princípios, ou seja, na obtenção de um valor do fator de delaminação. Em alguns casos propõe-se a ideia de que a disposição do dano em redor do furo, considerando a sua geometria, constitui um fator importante para o desempenho dos componentes quando em serviço.

No entanto, a relação existente entre o dano e esse comportamento foi apenas estudada por *Silva* [7] que propôs o estudo da influência do dano de delaminação sobre o comportamento à fadiga de CFRP, com o objetivo de quantificar a vida útil de um componente furado quando sujeito a cargas cíclicas. Foram realizados ensaios mecânicos de tração, para caracterizar o material utilizado, procedendo-se posteriormente à sua simulação. Através destes foi possível verificar a influência da delaminação na ocorrência de fratura, observando-se que a quantidade de dano é um fator importante. No entanto, a geometria da zona delaminada é o fator mais relevante quando se trata da análise de fadiga, concluindo que quanto maior é o fator de delaminação, menor é o tempo de vida útil à fadiga. Foram realizadas três réplicas para cada caso, com fatores de delaminação idênticos. A partir dos resultados obtidos concluiu-se que diferentes direções preferenciais do dano influenciam a vida à fadiga dos componentes. Desta forma, a fratura do componente dá-se, maioritariamente, devido à orientação das falhas.

2.4 Ensaios não Destrutivos

Um ensaio não destrutivo (END) consiste num processo de inspeção com o intuito de detetar defeitos num material ou componente, sendo também utilizado no controlo de qualidade. Nestes ensaios, não existe qualquer tipo de destruição ou de condicionamento no que é inspecionado [8,15]. Todos os componentes de engenharia estão suscetíveis a defeitos, podendo estes ter origem na matéria-prima, na fabricação de um determinado componente, na montagem ou devido à degradação do material durante a sua utilização. A aplicação destes ensaios depende do material a inspecionar, das características do defeito e da acessibilidade e condições de inspeção [1,8].

A inspeção visual é o primeiro END a realizar, sendo somente possível a deteção de defeitos à superfície do furo, nomeadamente a delaminação à entrada/saída. Para compósitos que permitem a transmissão da luz até a uma determinada amplitude, como os compósitos reforçados com fibra de vidro e matriz polimérica, o dano pode ser avaliado através do auxílio da luz transmitida. Alguns autores caracterizam a forma e a área de impacto do dano em laminados de fibra de vidro através da utilização de um microscópio ótico. A área do dano, oval, na superfície, medido segundo a sua amplitude aumenta quase linearmente com o aumento da energia de impacto, dependendo do tipo e da concentração de tratamento da fibra de vidro, previamente realizado. Ainda que seja simples a obtenção de imagens com recurso a esta técnica, a maior desvantagem consiste na dificuldade de obter, com precisão, a profundidade interna do defeito [20].

No entanto, para medir a extensão do dano neste tipo de defeito, é necessário recorrer à técnica de END designada por radiografia (Raio-X). Esta técnica é a mais indicada para materiais compósitos, apresentando um menor custo associado, comparativamente a outras técnicas. O seu princípio de funcionamento baseia-se na diferença de absorção da radiação penetrante pelo objeto inspecionado. Esta diferença poderá ser proveniente de descontinuidades no material, nomeadamente vazios ou mudanças de espessuras. Através de uma película fotossensível, a radiação não absorvida é captada. Os defeitos irão conter uma diferente tonalidade das restantes partes do material, significando assim uma diferença na densidade do material e/ou espessura deste. O filme terá que ser posteriormente processado, não permitindo assim a visualização imediata do defeito. Com a utilização dos sistemas digitais, é possível a visualização imediata. Para a realização deste END poderá ser necessária a utilização de um líquido de contraste com características radiopacas, como por exemplo o dibromometano e o diiodometano [10,13,14,20].

A Figura 2.8 permite a visualização de como é realizado este tipo de ensaio.

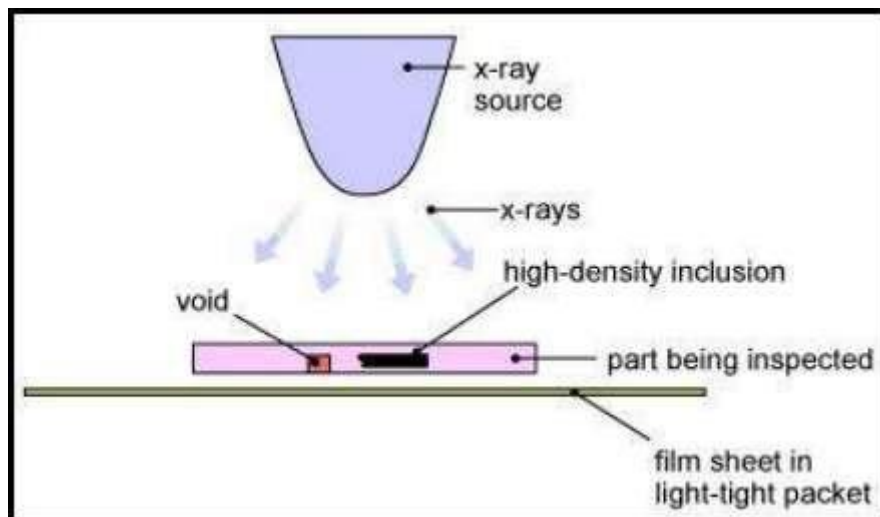


Figura 2.8 – Esquema de funcionamento da radiografia convencional [10]

Existe ainda outra vertente desta técnica, que utiliza a reconstrução de diversas imagens e, através do auxílio de sistemas eletrónicos, o dano poderá ser detetado e visualizado segundo diversos ângulos. Recentemente, foram desenvolvidas diversas técnicas baseadas em radiografia que permitem obter detalhadamente imagens tridimensionais (3D) de danos internos [20]. Visto que o foco deste estudo consiste nos defeitos à entrada e saída do furo, estas técnicas não apresentam qualquer tipo de vantagens para o estudo em causa.

A tecnologia com recurso a ultrassons tem vindo cada vez mais a ser utilizada como ensaio não destrutivo, para a avaliação dos defeitos em compósitos. O seu princípio de funcionamento consiste em impulsos de ultrassons, numa frequência compreendida entre 1 MHz e 1,5 GHz, sendo estes transmitidos através do material até um detetor. Poderão ser refletidos por este devido à heterogeneidade do material, incluindo defeitos internos, sendo utilizados com frequência transdutores piezoelétricos. A técnica de ultrassons mais vantajosa para estes tipos de materiais consiste no *C-Scan*, no qual pode ser avaliada qual a extensão do dano, em compósitos laminados. Esta vertente já foi bastante utilizada para a deteção de delaminação, porosidades e inclusões. Foi ainda recurso para a monitorização do início e da progressão de defeitos, resultantes de cargas aplicadas ou de fatores ambientais, provocando assim a sua degradação. É importante referir que a delaminação mencionada por estes autores consiste na interlaminar, sendo esta maioritariamente proveniente da produção do material e não da furação. Existem limitações, nomeadamente a elevada atenuação provocada pela absorção na resina e pela dispersão causada pelas fibras. Caso ocorra delaminação perto do local onde se encontra a sonda, pode verificar-se o efeito de sombra, o que causa a difícil deteção deste tipo de defeitos. Existem algumas variantes desta técnica, nomeadamente a microscopia acústica, em que é possível verificar uma maior sensibilidade a danos de impacto críticos, quando comparado com o *C-Scan*. Esta variante pode ainda ser dividida em duas distintas, como a *SLAM* (*Scanning Laser Acoustic Microscopy*) em que o detetor de laser permite obter imagens em tempo real, de características internas, como defeitos e descontinuidades e o *SAM* (*Scanning Acoustic*

Microscopy), em que a amostra é analisada linha a linha através da utilização de um feixe de ultrassom muito fino [20].

A utilização destas técnicas não apresenta muitas vantagens para este estudo pois a sua complexidade é muito elevada e são bastante dispendiosas. É ainda importante referir que o *C-Scan* depende da resolução do equipamento, ou seja, o tamanho dos pixéis é um fator limitativo para que se possa realizar, com alguma precisão, a avaliação dos defeitos.

Comparando as técnicas de radiografia digital e *C-Scan*, pode constatar-se que ambas servem para avaliar este tipo de dano. Assim, a sua seleção consiste somente na disponibilidade do equipamento, não existindo grandes diferenças visto ambas necessitarem de processamento de imagem subsequente para a correta caracterização do defeito.

2.5 Processamento de Imagem

O processamento de imagem surgiu como sendo uma necessidade, permitindo resolver três dos maiores problemas relacionados com imagens, nomeadamente:

- Digitalização e codificação da imagem para facilitar a sua transmissão, impressão e armazenamento.
- Melhoria e restauro de imagem permitindo, por exemplo, interpretar com maior facilidade imagens de superfícies de outros planetas, captadas por diversas sondas.
- Segmentação e descrição de imagem.

Atualmente, o processamento de imagem consiste somente em processar imagens digitais [21].

Lo Re et al. [22] propuseram-se a desenvolver um *software* que permitisse a segmentação, de uma forma semiautomática, de imagens que contêm poros de qualquer geometria, com o intuito de caracterizar a distribuição do tamanho do poro. O processamento de imagem foi utilizado com o objetivo de caracterizar a porosidade e a geometria dos poros de ácido láctico. Para tal, foi utilizado um algoritmo de processamento de imagem com o auxílio do *software Matlab*, sendo o procedimento para a segmentação de imagens dividido em quatro passos, nomeadamente o pré-processamento da imagem, o procedimento assistido para a determinação do *threshold*, a binarização e análise morfológica e, finalmente, a verificação do procedimento. Com o intuito de simplificar a análise, as matrizes de níveis de cinzento assumem valores entre 0 (preto) e 1 (branco). O programa desenvolvido permitiu o reconhecimento dos poros e possibilitou a informação sobre a distribuição do seu tamanho e a sua distribuição em área. Tudo isto foi possível com uma limitada interação humana, o que leva a concluir que a influência do operador que está a realizar estes testes é mínima. Este programa permitiu ainda obter mapas coloridos com as diferentes dimensões da estrutura dos poros com o objetivo de simplificar a sua análise. A utilização deste programa e do procedimento descrito pode facilmente ser estendida para materiais macios, como por exemplo hidrogel e membranas ou todos os materiais em que o

conhecimento da microestrutura é crucial para garantir o bom funcionamento de algum equipamento.

Liu et al. [23] propuseram-se a quantificar e caracterizar micro porosidades de argila, com recurso ao processamento de imagem e a métodos de medição geométrica. Através da aplicação destes métodos é possível calcular automaticamente, com o auxílio de um computador, parâmetros geométricos simples dos poros, como por exemplo, a área, o perímetro e a direção. Neste caso, o processamento de imagem consiste na segmentação, seguido da remoção de pontos brancos, na divisão dos poros e na remoção de poros com dimensão inferior a S_0 . S_0 consiste na área mínima do poro, sendo este um fator limitativo quanto à sua medição. O seu valor está compreendido entre os 30 e os 100 pixéis, sendo removidos todos os poros que tenham dimensão inferior a esta. É importante referir que o valor de *threshold* é definido pelo utilizador, sendo esta a grande desvantagem na quantificação da porosidade na argila.

Glud et al. [24] propuseram-se a estudar um método automatizado que permita enumerar a propagação de fissuras (*tunnelling cracks*) em compósitos reforçados com fibra de vidro (GFRP), através de ensaios mecânicos quase-estáticos e ensaios de fadiga. Durante o carregamento são captadas imagens de luz branca das amostras, sendo a luz transmitida utilizada para a deteção de fissuras nas imagens. Estas são posteriormente processadas com objetivo de determinar as fissuras à medida que se vão desenvolvendo e propagando. Tanto a reprodutibilidade como a precisão do processamento de imagem são demonstradas através de uma simulação transversa da densidade e do padrão das fissuras. Para a captação das imagens é colocada uma câmara digital num dos lados da amostra e a iluminação de fundo no lado oposto. A amostra é também iluminada frontalmente, para efeitos de compensação de imagem. O procedimento para a contagem automatizada de fissuras é constituído por três passos, iniciando-se pela compensação de imagem, seguindo-se a sua filtragem e finalmente a contagem de fissuras.

Posteriormente, é definida a densidade da fissura e realizada a sua validação numérica. É importante referir que este método é completamente automático e permite obter, de forma rápida e precisa, a caracterização do estado do dano em GFRP, em termos de fissuras transversas através da deteção, contagem, medição e monitorização. Os autores sugerem ainda que este método pode ser uma ferramenta útil para o desenvolvimento e validação futuros de modelos.

Perlo et al. [25] propuseram-se a aplicar um algoritmo de processamento de imagem a imagens de perfis de borracha, obtidas por ressonância magnética e gravadas através de um *scanner* de mesa de ressonância magnética. Embora a resolução espacial nominal destas imagens seja inerentemente mais baixa do que a de métodos óticos, estes autores demonstram que a resolução digital alcançada após as etapas do processamento de imagem permite determinar as posições espaciais dos contornos interiores e exteriores, com uma precisão de 50 μm . Assim, é possível medir dimensões estruturais de perfis de borracha, tais como espessuras ou vazios internos. Este método pode ser aplicado também a polímeros. O processamento de imagem é realizado segundo a seguinte ordem:

- Rápida aquisição, no domínio $k\text{-space}$ ¹, de uma imagem obtida por ressonância magnética com uma baixa resolução nominal;
- Preenchimento a zeros no domínio $k\text{-space}$ para 512x512 pixels com o intuito de aumentar a resolução digital;
- Transformação de Fourier a partir do domínio $k\text{-space}$ para o domínio da imagem, interpolando assim para uma maior resolução digital;
- Filtro mediano para remover ruído;
- Normalização local para compensar as flutuações dos níveis de cinzento, através da utilização de um auto-quociente da imagem (divisão desta por uma versão borrada da mesma);
- Binarização da imagem utilizando o valor médio de cinzento, μ_g^2 , como um valor limiar para o *threshold*, produzindo assim a estrutura do perfil.

A combinação desta técnica de ressonância magnética e o *scanner* com o processamento rápido de imagem digital oferecem uma ferramenta vantajosa para controlo direto de qualidade.

Davim et al. [8], para caracterizar a extensão do defeito à entrada e saída da broca, utilizaram a imagem digital da área do dano. A área do dano é obtida através da digitalização da imagem e do seu processamento. A imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz, onde as colunas e linhas identificam um ponto da imagem, em que cada valor corresponde à intensidade do lúmen nesse ponto. O processamento de imagem produz resultados satisfatórios, permitindo a observação e a análise de detalhes da imagem digitalizada. Com o intuito de obter uma imagem com uma qualidade aceitável, uma série de parâmetros deverão ser apropriadamente selecionados, como por exemplo a intensidade do brilho, supressão do ruído, melhoria da imagem e deteção das arestas. A imagem binarizada é submetida ao filtro de *threshold*, para eliminar todos os pontos cinzentos e pretos e, após este processo, o dano poderá finalmente ser medido. Através dos resultados obtidos, foi possível verificar que o sistema de aquisição de imagem digital demonstrou ser bastante útil na obtenção da área do dano, permitindo a sua recolha e a análise após a furação de compósitos. É ainda possível observar diversas características como a geometria do dano e o comportamento frágil destes materiais.

Silva et al. [5] realizaram a análise através do processamento de imagem da furação de amostras de CFRP. O objetivo principal foi estabelecer a necessidade de investigar mais pormenorizadamente as variáveis no processamento de imagem. Foi possível provar que os *thresholds* automático e manual são funcionais para a análise de imagens obtidas por radiografia digital. A imagem radiográfica pode ser melhorada através de diversos parâmetros, que em nada dependem do operador. No entanto, é indispensável a utilização de um agente de contraste. O aumento do nível do *threshold* influencia exponencialmente o decréscimo do fator de delaminação.

¹ Espaço conjugado de Fourier

² Cada pixel com valor de cinzento abaixo deste é considerado como 0, e os restantes pixels são considerados como 1

Verificou-se ainda que o *threshold* manual consiste numa boa ferramenta de análise experimental, no entanto, não se pode definir um nível constante padronizado. Isto acontece devido à dependência da área coberta do sensor e da linearização dos pontos mais distantes. Conclui-se assim que podem cometer-se erros na comparação de imagens do mesmo objeto, mas com diferentes níveis de *threshold*. É ainda possível afirmar que não existe nenhuma metodologia que permita a comparação de danos provocados pela furação, quando obtidos por diferentes investigadores.

2.6 Comentários Finais

Da pesquisa bibliográfica efetuada para este trabalho podem retirar-se algumas considerações a ter em conta para o desenvolvimento experimental.

No que diz respeito à furação a alta velocidade de materiais compósitos, verificou-se que a maioria das referências consultadas não destaca a importância do dano, nem o quantifica. Com efeito, a avaliação da qualidade dos furos é frequentemente realizada através da medição da rugosidade, desprezando o dano de delaminação.

Nas referências cujo objetivo é a avaliação do dano de delaminação, este foi avaliado através de radiografia digital ou *C-Scan*. Em qualquer dos casos, cada imagem foi processada computacionalmente e as regiões de interesse foram identificadas, sendo medidos os diâmetros e as áreas correspondentes ao dano. Estas são as variáveis das equações dos diversos fatores de delaminação propostos, sendo o mais utilizado o fator de delaminação clássico proposto por *Chen*. Por ter sido identificada a limitação da sua utilização, nomeadamente por não considerar a forma geométrica de distribuição do dano, foram propostos novos fatores. Destes, salientam-se o fator de delaminação ajustado (*Davim*) e o fator de delaminação mínimo (*Silva*). No entanto, estes fatores apenas quantificam o dano e, até ao presente, nenhuma proposta de caracterização da distribuição do dano foi concretizada.

No que concerne ao processamento de imagem, tem sido demonstrado ser um fator importante para a caracterização de determinados materiais. Este é aplicável em diversas situações com diferentes objetivos, quer em termos de forma quer em dimensão. A definição do *threshold* é de grande importância quando se trabalha com processamento de imagem uma vez que, se for utilizado de forma manual fica dependente da sensibilidade do operador, podendo conduzir a resultados erróneos. Nas referências citadas realça-se este facto como limitação das metodologias apresentadas. Esta limitação foi ultrapassada por *Silva* ao propor uma metodologia baseada na automatização do nível do *threshold*.

3 Metodologias e Procedimento Experimental

Neste capítulo será fundamentada a metodologia e apresentado o desenvolvimento do programa. Serão ainda abordados os materiais e métodos utilizados na parte experimental deste trabalho, bem como os equipamentos utilizados para a realização dos furos e a análise destes.

3.1 Fundamentos da Metodologia

Os tópicos que se seguem consistem em três diferentes abordagens consideradas, antes da elaboração do programa. Procedeu-se à análise de diferentes metodologias para aplicar a este estudo, tendo sido parcialmente testadas para avaliação da que mais se adequaria ao presente caso.

3.1.1 1ª Abordagem

Liu et al. [23] propuseram-se a quantificar micro porosidades em múltipla escala em imagens, com recurso a tecnologias de processamento de imagem e métodos de medição geométrica. Todas as operações realizadas são não-destrutivas, com o objetivo de garantir a precisão dos resultados. Estes métodos permitem uma rápida aquisição automática de parâmetros geométricos, tais como a área, o perímetro e a direção. Consequentemente, através de análise probabilística, pretende-se descrever a distribuição das três maiores características do sistema de poros, tais como a direção, a área e o fator de forma. Foi desenvolvido um programa, tendo como base estes métodos, para quantificar imagens de amostras de argila durante ensaios de corte, obtidas por microscopia eletrónica de varrimento (SEM).

Com o intuito de avaliar o comprimento e a largura do poro, foi definido o diâmetro de Feret (dF), como ilustrado na Figura 3.1. Este consiste na medida do tamanho de um objeto, segundo uma direção específica, sendo aplicado às projeções de um objeto tridimensional num plano 2D. Assim, este valor é obtido através da distância entre duas linhas tangenciais paralelas e é dado por:

$$\langle F \rangle = \frac{P}{\pi} \quad 3.1$$

Considerando que B_i ($i=1,2,3,\dots,n$) representa o vetor das coordenadas do limite do poro e B'_i ($i=1,2,3,\dots,n$) representa o novo vetor, após a rotação do poro, tem-se que a relação entre o novo vetor e o original é dada por:

$$B'_i = B_i \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad 3.2$$

onde θ representa o ângulo.

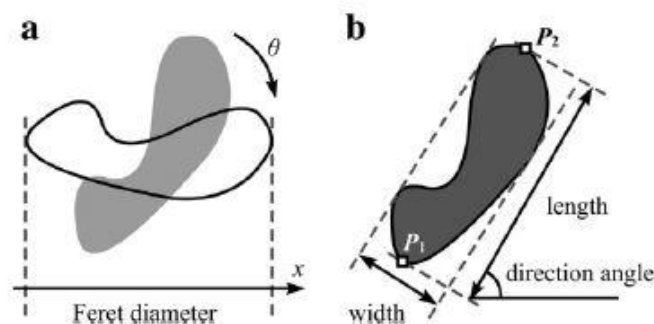


Figura 3.1 – Definição do diâmetro de Feret [23]

Desta forma, o diâmetro de Feret é dado por:

$$dF = X_{\max} - X_{\min} \quad 3.3$$

Onde X_{\max} e X_{\min} correspondem ao valor máximo e mínimo dos componentes x de B'_i , respetivamente.

Aumentando o ângulo de rotação (θ) entre 0° e 180° , é possível gerar uma série de valores para dF . Como se pode verificar na Figura 3.1, o comprimento e a largura do poro são os valores máximos e mínimos do diâmetro de Feret, respetivamente. P_1 e P_2 representam dois pontos tangentes ao máximo de dF , sendo a direção longitudinal do poro definida como o ângulo de inclinação da linha P_1P_2 . A medição de poros envolve a conversão de um poro em termos de pixels num vetor de forma, sendo utilizadas linhas retas para desenhar o limite dos poros e calcular o seu perímetro. Através dos três parâmetros estatísticos, entropia probabilística, fator de distribuição e dimensão fractal, utilizados para descrever as três maiores características dos poros, foi possível verificar que o número de poros diminui com o aumento da área. O maior problema verificado por estes autores na quantificação da porosidade na argila foi a escolha do *threshold*, por ter sido definido pelo utilizador.

3.1.2 2ª Abordagem

Os estudos para avaliar a recuperação de sistemas de informação de dados alfanuméricos são cada vez mais frequentes. O mesmo não acontece para sistemas de imagem, sendo um dos principais cuidados destes sistemas a caracterização automática do conteúdo da imagem e a recuperação de imagens, com base na similaridade do seu conteúdo.

Mehre et al. [26] propuseram-se a discutir a eficácia de diversas medidas de forma, para conteúdos baseados na recuperação de similaridade de imagens. As diversas medidas implementadas incluem características baseadas no contorno tais como código em cadeia, descritores de Fourier e características UNL de Fourier, características baseadas na região, nomeadamente momentos invariantes, momentos de Zernike e pseudo-momentos de Zernike, e a combinação de ambas.

Para uma dada imagem, todas as características da forma (vetores) são calculadas automaticamente e o seu vetor poderá ser utilizado com o objetivo de recuperação de imagem, ou poderá ser armazenado na base de dados para consultas futuras.

Estes autores testaram a eficácia das medidas de forma para conteúdos baseados na recuperação de similaridade de imagens e obtiveram uma eficiência de recuperação (a figura de mérito para a recuperação de imagem) para todos os métodos. Os testes realizados mostram que a combinação de características são vantajosas quando comparado com uma só, para uma recuperação de imagem eficaz.

Doretto et al. [27] propuseram-se a apresentar momentos de região, que consiste numa classe de descritores de aparência baseados em momentos de imagem, aplicados a várias características de imagem. Um projeto cuidadoso de momentos e características das imagens leva à invariância dos descritores de escala e rotação, sendo adequado para a deteção de veículos através de vídeo aéreo, onde os alvos aparecem em diferentes escalas e orientações.

Os momentos de região estão linearmente relacionados com características de imagem. Assim, comparar descritores através de distâncias geodésicas computacionais caras e classificadores não-lineares pode ser evitado, pois a geometria Euclidiana e os classificadores lineares continuam a ser eficazes. O descritor computacional é eficientemente obtido projetando um rápido procedimento baseado na representação integral. Uma comparação extensiva entre momentos de região e descritores de região (*region covariance descriptors*) apresenta diferenças em termos teóricos, qualitativos e quantitativos entre eles, verificando-se uma grande vantagem quanto aos primeiros, quando utilizados para detetar pequenas características numa imagem, como veículos em vídeo aéreo (Figura 3.2).

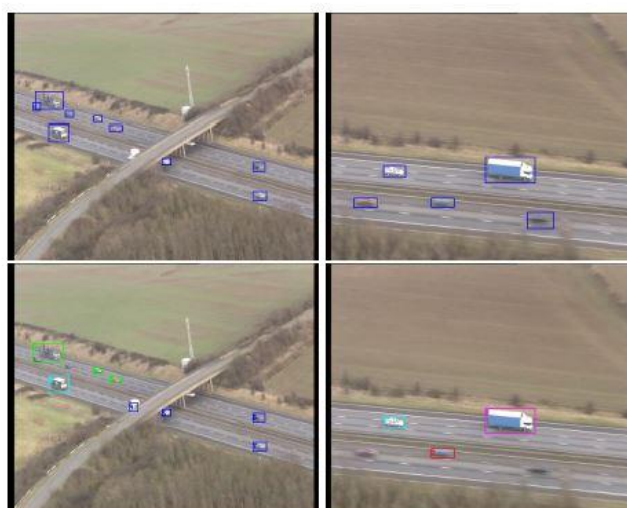


Figura 3.2 – Deteção de veículos em vídeo aéreo [27]

A forma é um dos elementos discriminatórios mais importante para a recuperação de imagens com base no seu conteúdo, sendo bastante desafiante para a sua quantificação e descrição. Com o objetivo de obter invariância quando existe rotação e mudança do ponto de partida, a maioria

das implementações do descritor de Fourier ignora a fase dos coeficientes de Fourier, perdendo consequentemente informações importantes acerca da forma.

Sokic et al. [28] propuseram um novo método para extrair os descritores de Fourier e que permita preservar a fase de coeficientes de Fourier. Foram introduzidos pontos específicos, aos quais estes autores denominam pontos *pseudomirror*, e estes são utilizados como uma referência de orientação de forma. Estes facilitam a extração de descritores que são invariantes quanto à: translação, escala, rotação e mudança de ponto de partida.

Os pontos *pseudomirror* podem ser vantajosos em diversas aplicações, nomeadamente quando combinados com a escala e translação normalizadas, baseadas no coeficiente de Fourier, permitindo a normalização do contorno com o objetivo de aplicar técnicas de descrição de forma mais complexas. O método desenvolvido por estes autores falha em certas situações, tais como quando existem articulações, grandes artefactos e partes em falta.

3.1.3 3ª Abordagem

Um dos maiores desafios na identificação e comparação de formas irregulares é a conceção de um descritor, que mantenha invariância sob uma ampla classe de transformações que a forma possa sofrer.

O *Heat Kernel* consiste numa solução fundamental da equação do calor, no estudo matemático da sua condução e difusão, num domínio específico, com condições limite especificadas. Recentemente, o *Heat Kernel Signature (HKS)* foi introduzido como um descritor, baseado na análise espacial.

Bronstein et al. [29] propuseram-se a desenvolver uma versão que não seja sensível ao efeito de escala, ou seja, independente do tamanho da forma a analisar. Este desenvolvimento baseia-se numa amostra espacial logarítmica, na qual a escala, usando uma constante multiplicativa, corresponde a uma translação. Esta translação é revertida através da magnitude da transformada de Fourier.

Esta proposta pode ser traduzida num conjunto vasto de formas, com diferentes características e o seu desempenho revelou-se superior ao da maior parte dos recentes algoritmos utilizados. Futuramente, este método poderá aplicar-se independentemente a zonas distintas de uma dada forma, permitindo a visualização de deformações inelásticas (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Exemplos de transformações utilizadas [29]

Sun *et al.* [30] propuseram um método semelhante, restringindo o *Heat Kernel* ao domínio temporal. É possível verificar que o *Heat Kernel Signature* capta toda a informação existente no *Heat Kernel*, caracterizando a forma até à sua isometria, o que significa que a restrição ao domínio temporal permite que o *HKS* seja mais conciso e facilmente comentável enquanto preserva todas as informações sobre a geometria intrínseca da forma a analisar. Adicionalmente, este mantém algumas propriedades do primeiro, o que permite que seja estável quando existem perturbações da forma.

A teoria de Morse permite revelar a estrutura topológica de uma forma, baseando-se em pontos críticos de uma função real sobre a forma a analisar. Uma escolha errada desta função poderá conduzir a uma configuração complexa, levando à existência de um elevado número de pontos críticos. Ni *et al.* [31] propuseram-se a apresentar uma forma simplificada da equação de Laplace, com o objetivo de encontrar uma função de Morse adequada, com um número e uma configuração de pontos críticos controlados pelo utilizador. Quando o número é mínimo, o resultado consiste num disco. Um número ilimitado de pontos críticos tem vindo a condicionar a aplicação desta teoria a uma ampla variedade de problemas em computação gráfica, processamento da malha e computação científica (Figura 3.4). Ao especificar pontos críticos adicionais às características da superfície, é possível obter uma melhor representação da geometria, partilhando a mesma topologia da malha inicial e podendo ainda agrupar numa malha em diferentes regiões.

Estes autores possibilitaram a superação da limitação existente, através do conceito de uma função de Morse adequada, que minimize a sua variação e permita produzir o menor número possível de pontos críticos.

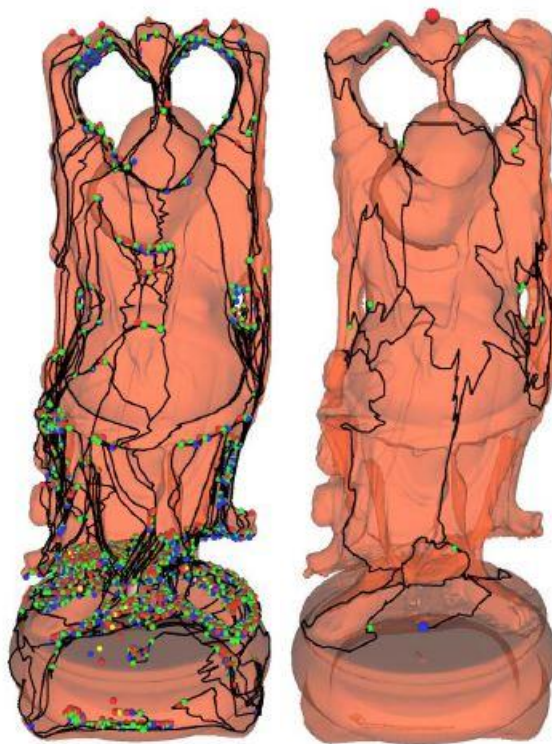


Figura 3.4 – Diferença entre uma má (esquerda) e uma boa (direita) selecção dos pontos críticos [31]

A representação de superfícies com deformação invariável, denominada *GPS embedding*, é introduzida por *Rustamov et al.* [32] através da utilização de valores e vetores próprios do operador diferencial da função de Laplace-Beltrami. Visto que a definição desta representação evita por completo a utilização de distâncias geodésicas, e baseia-se em objetos de carácter global, o resultado obtido é robusto para alterações topológicas globais. O *GPS embedding* captura informação suficiente para gerir várias tarefas de processamento de forma, tais como a sua classificação, segmentação e correspondência (Figura 3.5).

Estes autores descreveram uma nova estrutura para a representação de formas irregulares. A principal contribuição consistiu na introdução do *GPS embedding* como meio de separar uma superfície na sua transição, através de propriedades Euclidianas, para manter as características que são isometricamente invariantes. Não foram mencionadas superfícies com limites, no entanto, estes autores defendem que poderá ser aplicável a estas situações se forem escolhidas as condições limites adequadas. É ainda importante referir que existem dois problemas enquanto se trabalha com valores e vetores próprios: os sinais dos vetores próprios não estão definidos e dois vetores poderão estar trocados.

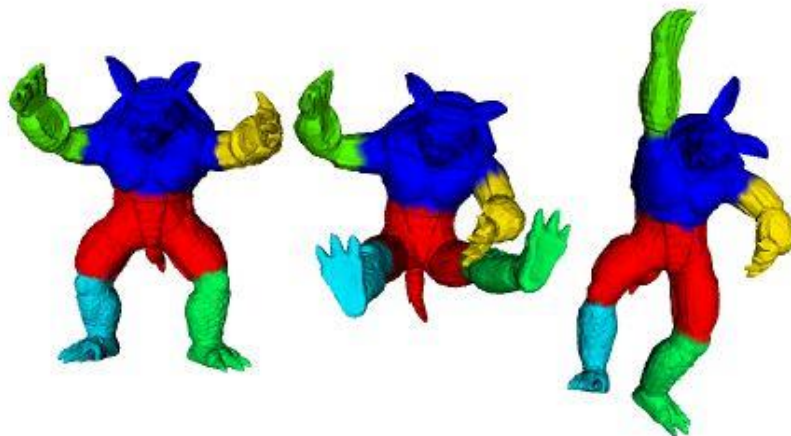


Figura 3.5 – Segmentação invariante com a posição [32]

Das três abordagens anteriormente apresentadas, nenhuma se mostrou completamente adequada ao trabalho a desenvolver. Na verdade, a segunda e terceira abordagens exigem conhecimentos de computação gráfica demasiado aprofundados para utilização num trabalho deste tipo, uma vez que são essencialmente do foro da engenharia informática e muito especializados. No entanto, pela sua análise foi possível encontrar uma solução que, baseada nas ideias aplicadas, mas aplicando a teoria do princípio da inércia, poderia constituir uma solução. Assim, foi com a convicção de que, com base neste pressuposto, seria possível estimar a direção preferencial do dano a partir do processamento de imagem, que se iniciou o desenvolvimento da ferramenta computacional.

3.2 Abordagem Proposta

A abordagem proposta consiste numa analogia ao cálculo dos momentos de inércia. O momento de inércia representa a resistência que um determinado elemento oferece ao movimento de rotação, sendo este referente a um eixo (Figura 3.6 (a)). Por outro lado, tem-se também o momento polar de inércia, J_0 , realçando-se o facto de este ser relativamente a um ponto de referência (Figura 3.6 (b)).

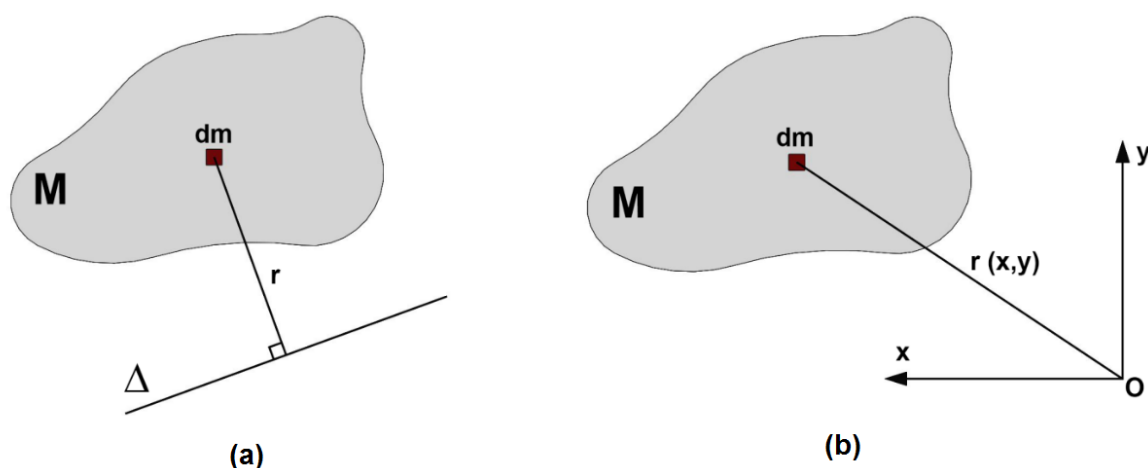


Figura 3.6 – (a) Momento de inércia ; (b) Momento polar de inércia

Considerando um conjunto de pontos materiais constituídos por massa dm , o momento polar de inércia é dado pela expressão:

$$J_0 = \int r^2 dm \quad 3.4$$

Visto que no presente estudo tem-se uma superfície plana, o momento polar de inércia poderá ser determinado através da soma dos momentos de inércia em relação a dois eixos perpendiculares, centrados no ponto de referência, sendo dado por:

$$J_0 = I_x + I_y \quad 3.5$$

A imagem obtida por radiografia digital, depois de feita a binarização, corresponde à superfície plana. A Figura 3.7 representa essa mesma imagem, sendo a sua dimensão de 800 x 800 pixel, que corresponde a uma matriz com 800 linhas e 800 colunas. A área branca corresponde ao dano, onde cada pixel branco da imagem representa um elemento do dano, considerado como um ponto de massa unitária, e os restantes, a preto, considerados como pontos de massa nula.

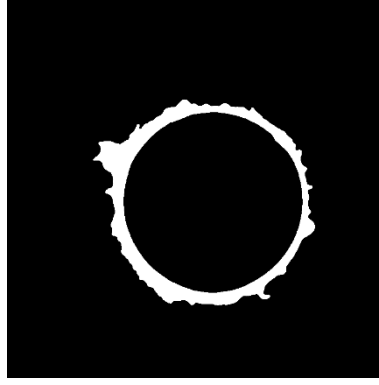


Figura 3.7 – Imagem binarizada após aplicação do *threshold*

Na figura abaixo representada, Figura 3.8, verifica-se a transformação realizada, ou seja, é possível verificar a rosa os valores onde existe dano e, consequentemente, o seu valor unitário numa matriz. Esta matriz, denominada por matriz A, consiste numa representação numérica da imagem, após a sua binarização e segmentação.

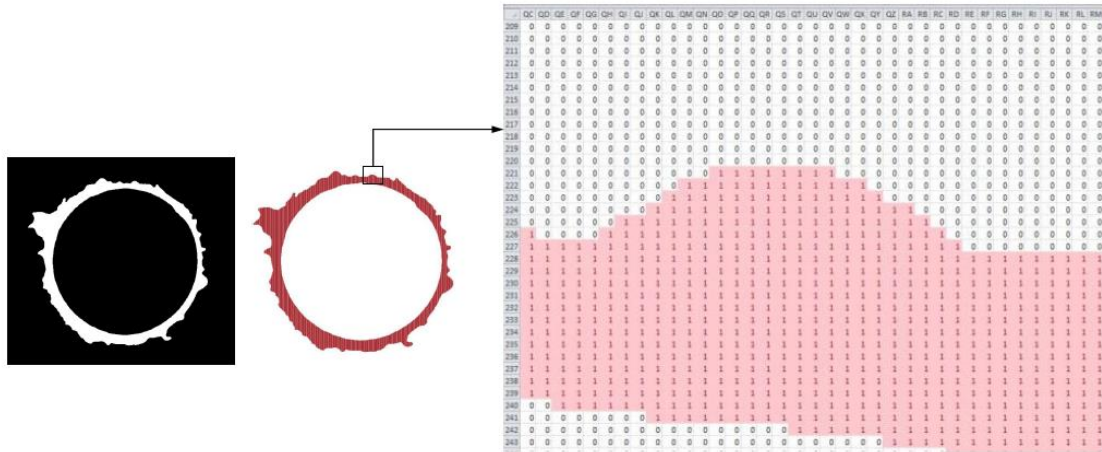


Figura 3.8 – Imagem binarizada e respetiva matriz

Assim, é possível determinar os momentos de inércia, em relação ao eixo x e ao eixo y, sendo estes dados pelas expressões 3.6 e 3.7. O ponto de referência considerado corresponde ao centro do furo e o eixo y é a direção das fibras.

$$I_x = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} y_{ij}^2 A_{ij} \quad 3.6$$

$$I_y = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} x_{ij}^2 A_{ij} \quad 3.7$$

i e j variam entre 1 e N_x ou N_y (800), correspondendo à dimensão da imagem. A corresponde à matriz da imagem, sendo $A_{ij} \Leftrightarrow m_{ij}$.

É ainda possível determinar o produto de inércia, sendo este definido pela expressão:

$$P_{xy} = \sum_{ij} x_i x_j m_{ij} \quad 3.8$$

Assim, as equações 3.6, 3.7 e 3.8 apresentam valores não nulos para a zona na qual estão representados os defeitos, sendo construída a matriz de inércia:

$$I = \begin{bmatrix} I_x & -P_{xy} & 0 \\ -P_{xy} & I_y & 0 \\ 0 & 0 & J_0 \end{bmatrix} \quad 3.9$$

Após a construção da matriz, é possível determinar os valores e vetores próprios, obtendo-se desta forma qual a direção onde ocorre o maior dano, associada ao maior vetor e valor próprios, e a direção onde existe um defeito mais reduzido. Estes valores são determinados através do polinómio característico da matriz I (equação 3.10).

$$|I - \lambda I_n| = 0 \quad 3.10$$

Na qual λ representa o valor próprio e I_n a matriz identidade.

No caso deste trabalho, o momento polar de inércia poderá corresponder à extensão do dano induzido pelo processo de furação. Desta forma, a intensidade do dano será tanto maior quanto maior for o seu valor [33].

3.3 Procedimento Experimental

Neste tópico será apresentado o procedimento experimental realizado para a concretização do trabalho da presente dissertação. Em primeiro lugar será feita a caracterização dos provetes e apresentada a montagem experimental para realização dos ensaios. Esta consiste nos equipamentos utilizados para a furação e aquisição de dados. Descrevem-se ainda as ferramentas utilizadas e os parâmetros de corte. Finalmente, descreve-se o procedimento para aquisição da imagem do dano através da técnica de ensaios não destrutivos de radiografia digital (raios-X).

3.3.1 Material e Equipamento Utilizado

O material utilizado consiste em provetes planos, cujas dimensões são de 250 x 25 mm. Foram utilizadas 10 camadas empilhadas unidireccionalmente de tecido pré-impregnado de fibra

de carbono CC206 ET445, com uma espessura de 0.2 mm, para obtenção de um laminado com 2 mm de espessura, tendo sido realizada a sua cura, em vácuo, durante 30 minutos a 125° C.

Na Figura 3.9 é apresentada a montagem experimental para a realização dos ensaios. O processo de furação foi realizado no centro de maquinagem LEADWELL VMC-15, disponível no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT-UNL. Para obter a gama de velocidades, foi adaptada uma cabeça de alta velocidade Nikken BT30-NX5-153, permitindo assim uma velocidade máxima de 20 000 rpm. Através da utilização de um dinamómetro Kistler 9257B, foi possível realizar a monitorização e a aquisição de dados relativos à força axial, estando este ligado a um amplificador de carga multicanal Kistler 5070. A conversão do sinal analógico em digital realizou-se num sistema de aquisição de dados (DAQ). Após o processamento do sinal, os dados correspondentes aos valores medidos foram apresentados através do *software* LabVIEW.



Figura 3.9 – Montagem experimental

As ferramentas utilizadas foram brocas helicoidais com ângulo de ponta de 120° em metal duro (K20) que possuem a resistência à abrasão e ao desgaste requeridas para furar compósitos de fibra de carbono, com diferentes diâmetros.

Os valores atribuídos aos parâmetros de corte e diâmetro da ferramenta e utilizados na componente experimental encontram-se descritos na Tabela 3.1. Foi realizado um total de 27 ensaios nas diferentes condições.

Tabela 3.1 – Valores atribuídos às variáveis do processo

Parâmetros	Valores utilizados		
Velocidade de corte [m/min]	200	250	300
Avanço [mm/rev]	0.1	0.15	0.2
Diâmetro da ferramenta [mm]	5	7	9

3.3.2 Radiografia Digital

A visualização do dano de delaminação nas peças furadas foi efetuada usando ensaios não destrutivos, nomeadamente radiografia digital. Para a deteção e posterior análise do defeito foi necessário utilizar um líquido de contraste, nomeadamente o diiodometano. Os provetes foram previamente imersos num líquido contrastante de diiodometano, durante um período de tempo de cerca de 5 minutos. Este tempo é reduzido porque como as placas são pouco espessas verifica-se o efeito de capilaridade. Outro parâmetro que foi escolhido com alguma precaução, foi o tempo de exposição à radiação. Uma escolha incorreta relativamente a estes tempos poderá inviabilizar a boa visualização dos efeitos da delaminação.

No presente trabalho utilizou-se a técnica de radiografia digital, com recurso a um sistema de RX Kodak 2100, associado a um sistema digital de aquisição de imagem Kodak RGV 5100. Os provetes foram radiografados perpendicularmente à fonte de radiação, com uma energia máxima de 70 Kv, frequência de 300 kHz e intensidade de corrente de 7 mA. O tempo de integração foi de 0.16 s e a distância focal 50mm. É importante ainda salientar que foram tomadas medidas de segurança, como por exemplo, a utilização de um caixa de chumbo, protegendo desta forma o utilizador. O sistema digital de aquisição permitiu obter as imagens para posterior processamento, guardadas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*) com resolução de 1200 x 1600 pixéis. A Figura 3.10 permite a visualização deste equipamento.



Figura 3.10 – Equipamento de radiografia digital

3.4 Metodologia Proposta e Desenvolvimento em *Matlab*

Silva [4] desenvolveu um modelo em *Matlab* que quantifica o dano causado pela furação de compósitos reforçados com fibra de carbono. Nesta metodologia, a imagem final é obtida através da subtração de radiografias pré e pós furação. No processamento de imagem, este autor verificou que o *threshold* é a variável mais significativa, causando variações quanto aos fatores de delaminação. Assim, o programa desenvolvido teve como objetivo automatizar o cálculo desta variável, permitindo assim que o seu valor não seja condicionado pelo utilizador. Assim, este programa baseia-se no algoritmo de *threshold* automático de Otsu.

O objetivo deste trabalho visa a continuação desta investigação. A partir do programa desenvolvido para a aplicação automática do *threshold*, pretende-se não só quantificar o dano, mas caracterizar também a sua geometria, através da direção dos vetores próprios da imagem. Assim, neste tópico será explicado sucintamente o programa desenvolvido.

Inicialmente, as imagens obtidas por radiografia foram adquiridas e processadas, realizando-se a sua binarização, ou seja, a imagem é segmentada deixando somente os pontos de interesse para análise. Posteriormente, segue-se a análise da imagem, a preto e branco e com o dano bem definido. A figura a preto e branco, após a segmentação, é convertida numa matriz de 0 e 1, sendo o seu valor 0 quando os pixels são pretos e 1 quando são brancos, como acontece na zona onde se encontra a deformação.

Esta matriz é então utilizada como recurso ao cálculo dos momentos de inércia e do momento polar de inércia. Uma vez tendo estes valores, é possível construir a matriz de inércia e calcular os valores e vetores próprios. Através do maior valor próprio e do seu respetivo vetor, é possível representar graficamente a direção principal do dano, ou seja, identificar a região onde se tem uma maior densidade de brancos, o que significa que essa será região crítica.

Um dos fatores verificado no decorrer do programa consiste na excentricidade do dano, podendo o seu valor variar entre 0 e 1. Esta característica permite verificar qual o afastamento do centro do furo ao centro do dano. Quanto mais próximo de 0 estiver mais circular é o defeito, o que se verifica ser benéfico pois um círculo perfeito tem excentricidade 0.

Segundo *Chen* [6], o centro do furo coincide com o centro do dano. Desta forma, definiu-se um círculo com centro coincidente com o centro do furo e que passe pelo ponto mais afastado do defeito.

A metodologia proposta baseia-se nos seguintes passos:

1. Seleção da região de interesse da imagem radiográfica, ou seja, uma imagem de 800 x 800 pixel;
2. Segmentação (binarização) dos conteúdos da imagem, com *threshold* automático;
3. Caracterização do furo através da representação gráfica dos elementos calculados. Utilizou-se a matriz da imagem como recurso no cálculo dos momentos de inércia e do momento polar de inércia seguindo-se assim a construção da matriz de inércia. Desta forma, é possível calcular os valores e vetores próprios, sendo possível identificar a região crítica através do maior valor próprio e o seu respetivo vetor.
4. Recolha dos resultados obtidos sob a forma de tabela.

Para uma melhor perceção desta metodologia, apresentam-se as Figura 3.11 e Figura 3.12, nas quais se podem verificar as imagens provenientes após a realização dos passos acima descritos.

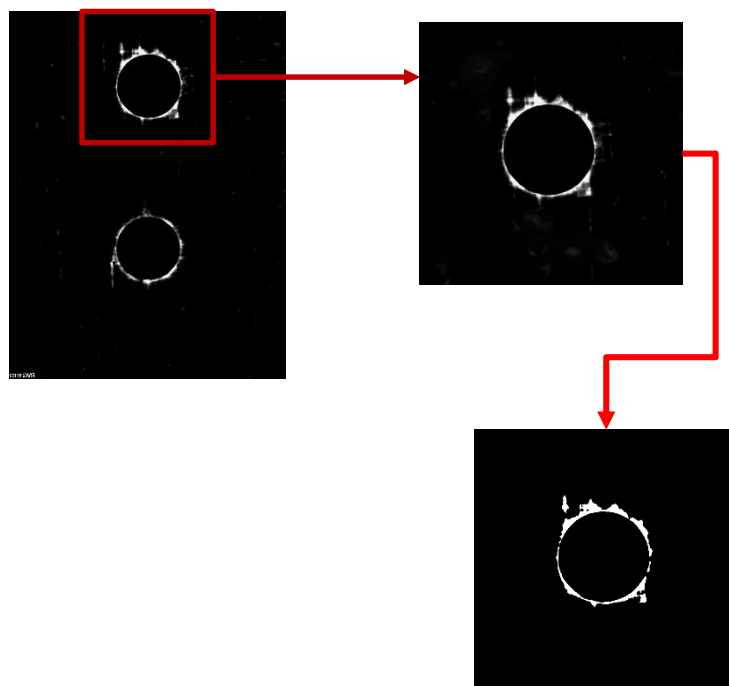


Figura 3.11 – Passos 1 e 2 da metodologia

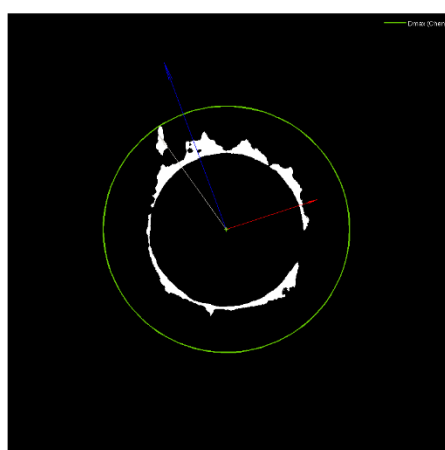


Figura 3.12 - Resultado final obtido

A análise das imagens provenientes dos ensaios de radiografia, após a realização do passo 1 da metodologia proposta, foi realizada através do programa *Delamination* (Anexo A). Este programa constitui uma rotina principal, onde se incluem dois programas, *otsu_calc* (Anexo B) e *hough_processing* (Anexo C), onde se convertem em milímetros os valores obtidos em pixel e se obtém a tabela dos resultados pretendidos para a caracterização do dano induzido pelo processo de furação (passo 4 da metodologia). O algoritmo para definição automática de *threshold* é calculado através do programa *otsu_calc* (passo 2 da metodologia). O programa *hough_processing* define as propriedades da imagem após segmentação, incluindo a definição

dos valores e vetores próprios, representando-os graficamente e gravando as respetivas imagens (passo 3 da metodologia).

4 Apresentação e Discussão de Resultados

Os resultados obtidos através do *Matlab*, após a análise de diversas imagens, para a presente dissertação serão apresentados e devidamente discutidos neste capítulo.

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores obtidos automaticamente para a quantificação do dano através do programa desenvolvido. O fator de delaminação clássico (*Chen*) é apresentado para cada ensaio realizado com diferentes parâmetros.

Tabela 4.1 – Resultados experimentais

Ensaio	v (m/min)	F (mm/rev)	d (mm)	Factor de delaminação
A1_V1	200	0,1	5	2,035
A1_V2	250	0,2	5	2,191
A1_V3	300	0,15	5	2,203
A1_V4	200	0,15	7	1,577
A1_V5	250	0,1	7	1,353
A1_V6	300	0,2	7	1,451
A1_V7	200	0,2	9	1,113
A1_V8	250	0,15	9	1,183
A1_V9	300	0,1	9	1,027
A2_V10	200	0,1	5	1,628
A2_V11	250	0,2	5	1,443
A2_V12	300	0,15	5	1,478
A2_V13	200	0,15	7	1,176
A2_V14	250	0,1	7	1,350
A2_V15	300	0,2	7	1,253
A2_V16	200	0,2	9	1,213
A2_V17	250	0,15	9	1,073
A2_V18	300	0,1	9	1,066
A3_V19	200	0,1	5	1,717
A3_V20	250	0,2	5	1,664
A3_V21	300	0,15	5	1,627
A3_V22	200	0,15	7	1,248
A3_V23	250	0,1	7	1,244
A3_V24	300	0,2	7	1,292
A3_V25	200	0,2	9	1,019
A3_V26	250	0,15	9	1,008
A3_V27	300	0,1	9	1,096

Através da análise de diferentes imagens é possível verificar se existe alguma diferença relativamente aos vetores próprios e aos pontos mais afastados da origem, sendo esta representação feita a partir do centro do furo. Em todos os casos os vetores próprios estão representados a azul e vermelho, correspondendo ao maior e ao menor valor próprio, respetivamente, esperando-se que estes sejam ortogonais entre si. Para verificar a existência de diferenças entre estes e o ponto mais afastado da origem desenhou-se outro vetor, representado a cinzento, que indica qual a localização do ponto extremo do dano.

Para a avaliação do desempenho da ferramenta computacional desenvolvida criaram-se imagens de validação. As imagens criadas são simples, apresentando defeitos conhecidos e estrategicamente colocados. A Figura 4.1 consiste num círculo perfeito com dano numa só direção. Como se pode verificar, tanto o maior vetor próprio como o vetor referente ao ponto extremo estão coincidentes, o que seria de esperar visto que o dano está localizado nessa direção.

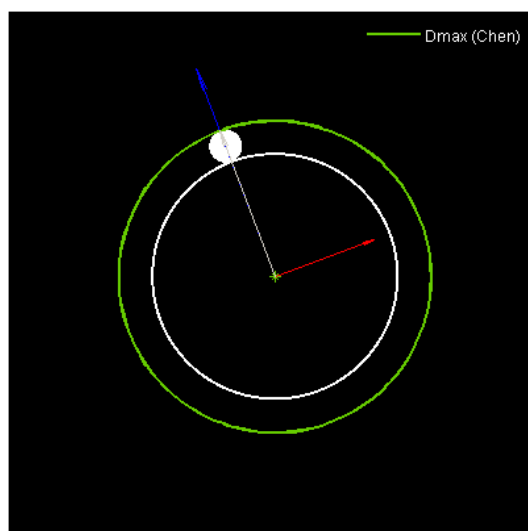


Figura 4.1 – Teste de validação 1

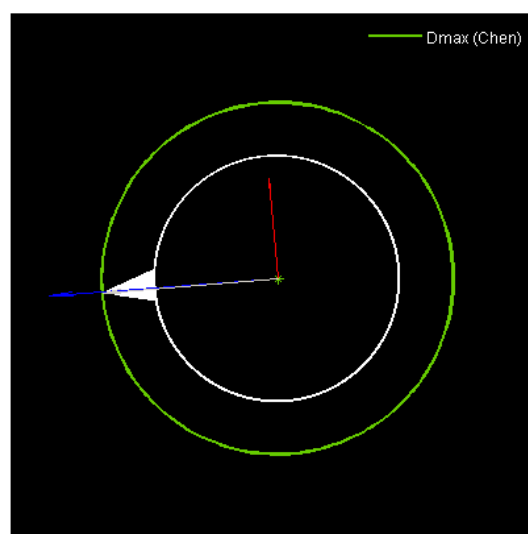


Figura 4.2 – Teste de validação 2

O mesmo se verifica no caso em que o defeito apresenta uma diferente geometria e uma diferente direção (Figura 4.2).

Analisemos agora um caso diferente. Na Figura 4.3 tem-se dois defeitos iguais, mas com diferentes direções. Note-se que o vetor azul está direcionado, aproximadamente, para o centro destes, o que seria de esperar pois ao existirem os dois, provocam uma rotação destes vetores. Há também uma coerência quanto ao ponto máximo, sendo este representado pelo vértice do triângulo, estando contido abaixo do diâmetro máximo que circunscreve o dano (verde).

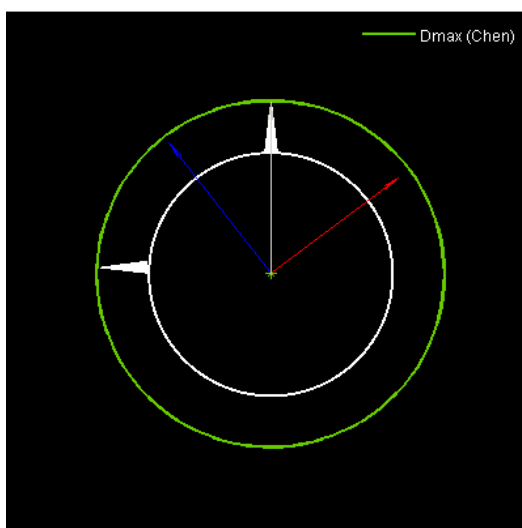


Figura 4.3 – Teste de validação 3

A Figura 4.4 representa outra versão dos testes de validação, em que se verifica que o vetor tende para a localização da maior densidade do defeito. O vetor azul não é coincidente com o do ponto extremo devido ao momento polar de inércia, não sendo este nulo devido à existência de um outro defeito, o que provoca uma rotação destes vetores.

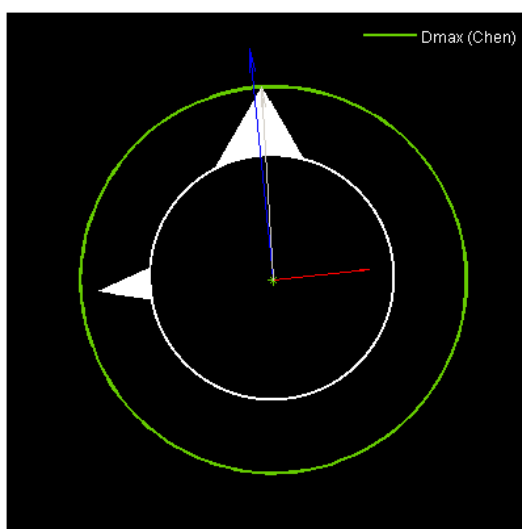


Figura 4.4 – Teste de validação 4

A Figura 4.5 representa um dos furos, na qual se pode verificar que o menor vetor, vermelho, aponta para a direção onde o dano é menor. Por outro lado, vê-se uma coerência quanto ao maior vetor, azul, e o ponto máximo, representado pelo vetor cinzento, estando ambos direcionados para a zona que tanto visualmente como quantitativamente representam a zona crítica, ou seja, a direção sob a qual existe um maior defeito. Apesar destes não serem iguais, a diferença apresentada não é relevante pois tem-se uma imagem que fisicamente é pequena e os vetores são bastante próximos. É ainda importante referir que os vetores azul e vermelho são ortogonais entre si, o que seria de esperar visto representarem os vetores próprios, associados aos respetivos valores próprios.

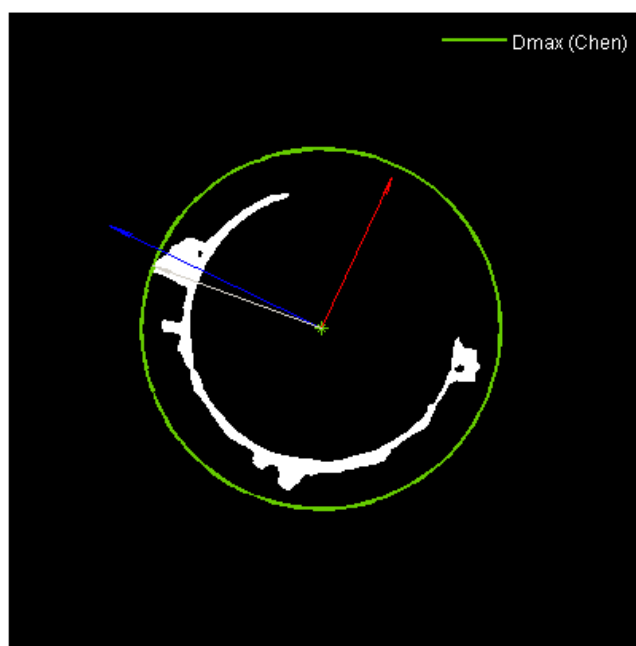


Figura 4.5 – Ensaio A3_V20 ($F_d = 1.664$)

Analisemos agora outro caso. A Figura 4.6 apresenta igualmente os vetores ortogonais, no entanto, verifica-se uma diferença quanto ao maior vetor, azul, e o vetor correspondente ao ponto máximo, cinzento. Efetivamente isto acontece devido à influência que o menor vetor impõe no maior, fazendo assim uma rotação de modo a manter a sua perpendicularidade. Os vetores azul e cinzento não têm necessariamente que apresentar a mesma direção, uma vez que o ponto extremo do dano pode não coincidir com a zona de maior distribuição do dano. Verifica-se um caso semelhante a este na Figura 4.7.

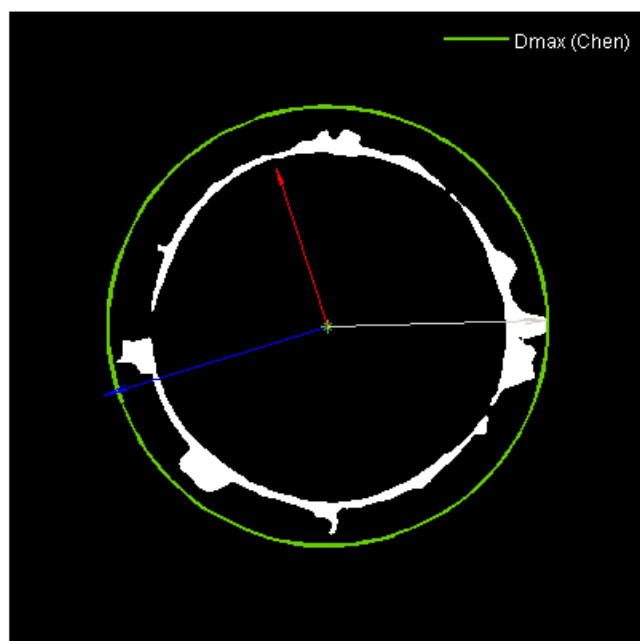


Figura 4.6 – Ensaio A1_V6 ($F_d = 1.451$)

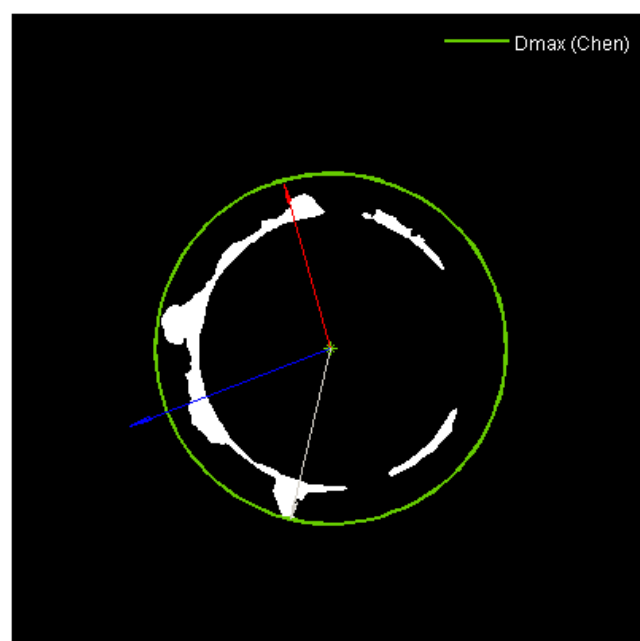


Figura 4.7 – Ensaio A3_V21 ($F_d = 1.627$)

No decorrer desta investigação, foi possível apurar gráficos onde o ponto máximo se encontrava no topo da imagem ou fora do círculo representado a verde, localizado onde não se verificam danos. No entanto, ao visualizar a matriz de 0 e 1 da imagem tem-se uma mancha de valores não-nulos, exatamente localizados na zona para a qual o vetor cinzento aponta. Isto demonstra a possibilidade de ser necessário afinar o cálculo do *threshold*, pois todas as imagens foram obtidas e binarizadas de igual forma, bem como o cálculo dos momentos de inércia e valores e vetores próprios. A Figura 4.8 demonstra um destes casos, podendo verificar-se a

existência de uma mancha, representada a rosa, localizada numa zona da figura em que visualmente só se averigua preto.

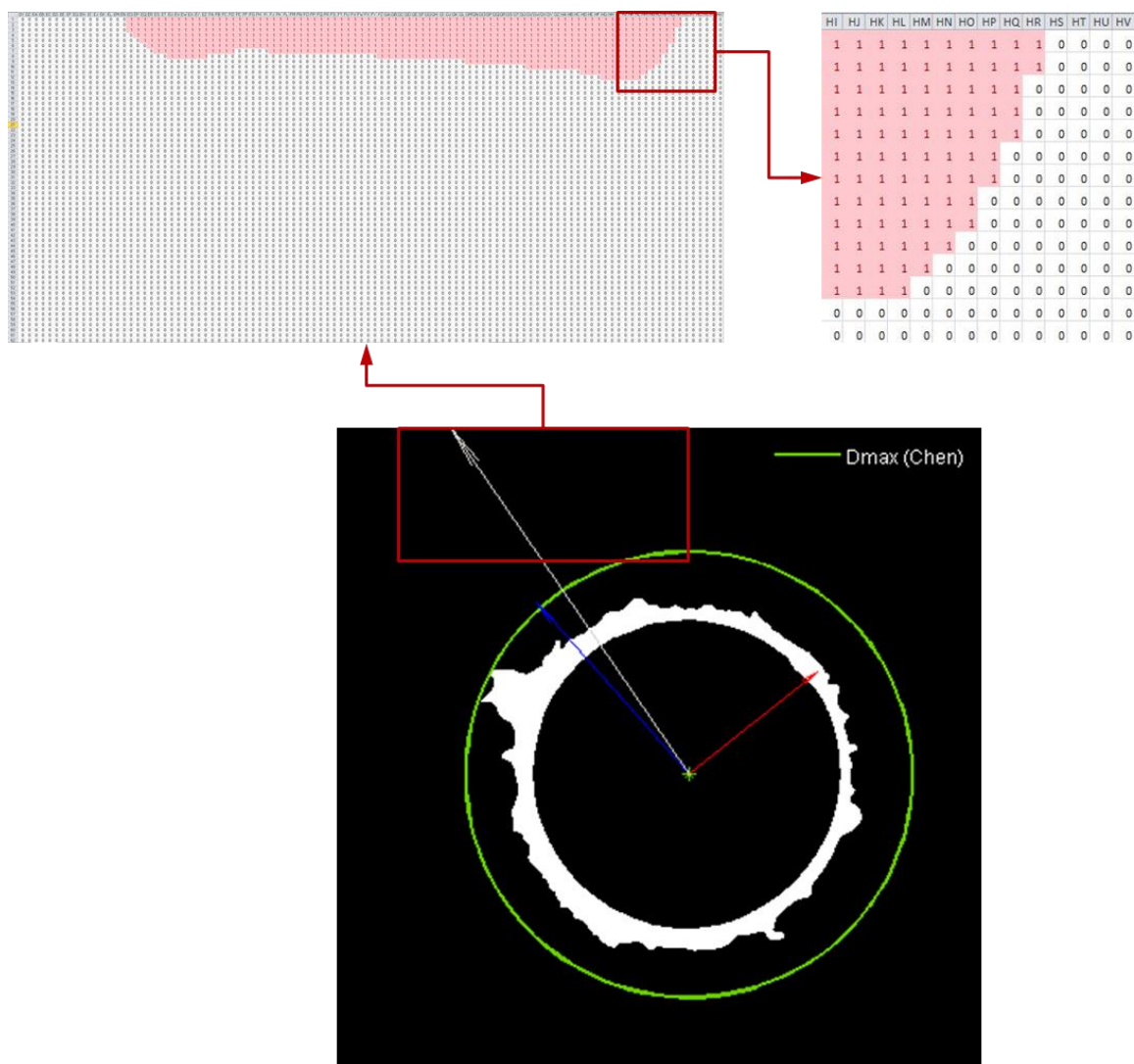


Figura 4.8 – Análise da imagem A1_V1 e da sua respetiva matriz

Esta situação foi resolvida pela substituição dos pontos 1 por 0 na matriz correspondente à imagem. Devido ao facto de o programa ter sido desenvolvido para considerar imagens de furos com diferentes diâmetros nominais, esta substituição teve que ser realizada considerando a área exterior a uma extensão de dano considerada relativamente ao diâmetro do furo analisado.

Como comparação e após este procedimento, repetiu-se a análise do ensaio A1_V1. Obteve-se então a Figura 4.9, que apresenta todos os vetores representados e direcionados para a direção esperada.

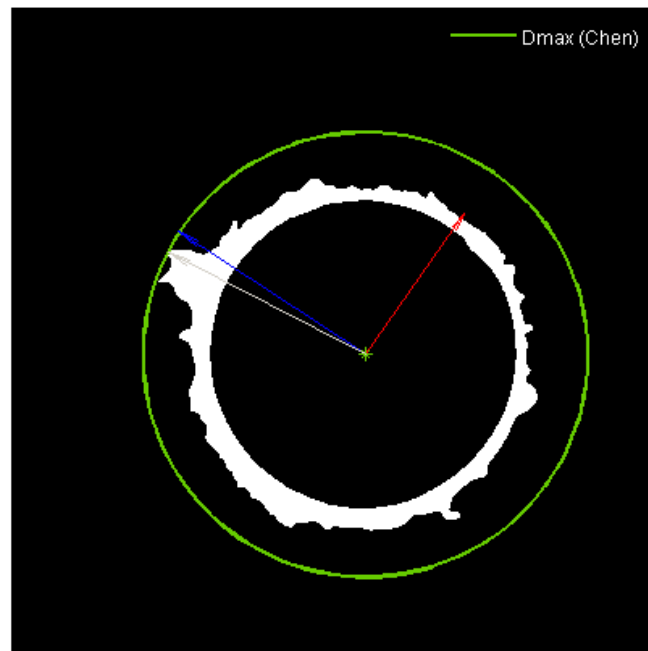


Figura 4.9 – Ensaio A1_V1 após o ajuste da matriz

O mesmo se verifica para a Figura 4.10, na qual utilizando a rotina anteriormente referida, se obteve uma diferença significativa entre as duas imagens.

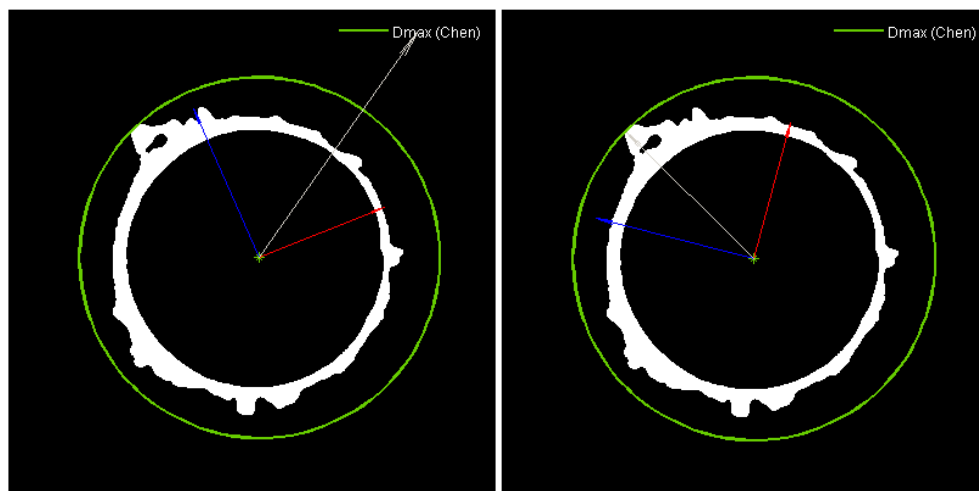


Figura 4.10 – Ensaio A1_V2 antes de ajustar a matriz (esquerda) e após o ajuste (direita)

Foi realizada uma última verificação, com o objetivo de averiguar a disposição dos vetores próprios nos provetes realizados por Silva [7]. No estudo realizado por este autor foi possível verificar que, apesar dos fatores de delaminação serem semelhantes, dois dos provetes sujeitos a ensaios de fadiga fraturaram (Figura 4.11 (a) e (b)) e outro resistiu a este ensaio (Figura 4.11 (c)). Este fenómeno poderá ter acontecido devido às direções dos vetores próprios, confirmando assim a importância que estes têm na caracterização da vida útil de um componente, quando sujeito a cargas cíclicas. Assim, para um fator de delaminação muito próximo é possível obter diferentes

direções preferenciais, demonstrando que este fator não é suficiente para caracterizar o dano, sendo necessário considerar tanto sua a geometria como a sua direção.

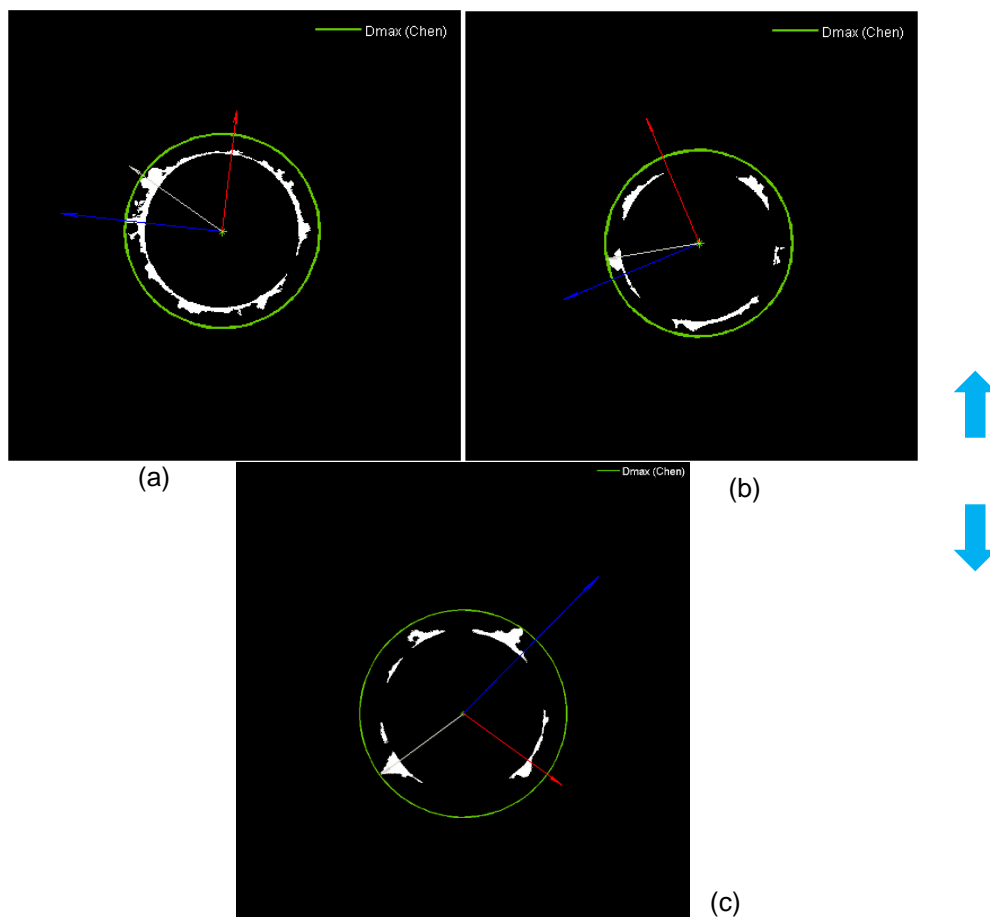


Figura 4.11 – (a) Ensaio A4_V1, com $F_d = 1.271$; (b) Ensaio A4_V2, com $F_d = 1.222$;
(c) Ensaio A4_V3, com $F_d = 1.305$

As setas apresentadas na figura representam a direção na qual a carga é solicitada, durante os ensaios de fadiga.

5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Neste trabalho desenvolveu-se uma ferramenta computacional, no *software Matlab*, que permitiu a caracterização do dano após a furação a alta velocidade de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono. O defeito de delaminação é o mais relevante e foi possível não só quantificá-lo, mas também caracterizá-lo, com o intuito de através de uma metodologia abrangente obter uma padronização para a identificação destes danos.

Através de toda a investigação realizada e a sua aplicação, foi possível concluir que:

- A estratégia de adaptar os momentos de inércia mostrou-se bastante viável, sendo possível identificar a direção na qual ocorre o maior e menor dano.
- O fator de delaminação quantifica o dano, no entanto, o seu valor representa um escalar não sendo suficiente para a caracterização do defeito.
- Foi validada a suspeita de que a direção dos defeitos dos furos das ligações mecânicas relativamente à direção das solicitações pode influenciar a vida à fadiga dos componentes fabricados neste tipo de material.
- É possível realizar a análise quantitativa e, simultaneamente, caracterizar o dano de delaminação induzido pela furação de componentes fabricados em CFRP, utilizando a ferramenta computacional desenvolvida de forma totalmente automática.
- Os testes de validação, realizados com imagens nas quais o dano exhibe geometrias definidas, demonstraram a adequabilidade da metodologia.

Os resultados obtidos são muito satisfatórios na medida em que com o *input* da imagem obtida por radiografia digital se obtém, com um único programa e de forma totalmente automática, toda a caracterização do dano de delaminação induzido pelo processo de furação. Este trabalho constitui assim um contributo significativo para a deteção de possíveis problemas em componentes constituintes de montagens com ligações mecânicas, de forma rápida e eficiente, possibilitando a prevenção de problemas relacionados com falhas durante o funcionamento das mesmas.

O objetivo deste trabalho foi concretizado na medida em que, aplicando a ferramenta computacional desenvolvida, é possível caracterizar quer em termos dimensionais, quer geométricos, o dano induzido pela operação de furação em componentes produzidos em materiais compósitos.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

De modo a completar todo o trabalho desenvolvido relativamente a este tema seria necessário calibrar a aquisição, a binarização e a segmentação da imagem, para evitar situações nas quais surgem regiões de pontos brancos fora da região relativa ao dano. Desta forma, a aplicação desta metodologia poderá ser realizada de forma automática e inequívoca. Por outro lado, seria interessante adaptar a metodologia a outros tipos de defeitos e ensaios não destrutivos, tornando-a de utilização ainda mais abrangente.

Referências bibliográficas

- [1] M. F. S. F. Moura, A. B. Morais, and A. G. Magalhães, *Materiais Compósitos*, 2ª Edição. Publindústria.
- [2] “The History of Composites,” *About.com Money*. [Online]. Available: <http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>. [Accessed: 21-Jan-2016].
- [3] “Boeing: 787 Dreamliner.” [Online]. Available: <http://www.boeing.com/commercial/787/#/design-highlights/visionary-design/composites/advanced-composite-use/>. [Accessed: 23-Jan-2016].
- [4] D. Silva, “Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP,” Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [5] D. Silva, J. P. Teixeira, and C. M. Machado, “Methodology analysis for evaluation of drilling-induced damage in composites,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 71, pp. 1919–1928, 2014.
- [6] W.-C. Chen, “Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 37, no. 8, pp. 1097–1108, Aug. 1997.
- [7] P. Silva, “Influência do Dano Resultante do Processo de Furação no Comportamento à Fadiga de Materiais Compósitos,” Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.
- [8] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. M. Abrão, “A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 1939–1945, Jul. 2007.
- [9] J. C. C. Rubio, A. M. Abrão, P. E. Faria, A. E. Correia, and J. P. Davim, “Delamination in High Speed Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP),” *J. Compos. Mater.*, vol. 42, no. 15/2008, pp. 1523–1532, 2008.
- [10] C. M. M. Tavares, “Influência da Força de Aperto na Minimização do Dano em Furação a Alta Velocidade em Materiais Compósitos,” Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [11] E. Persson, I. Eriksson, and L. Zackrisson, “Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates,” *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 28, no. 2, pp. 141–151, 1997.
- [12] D. Liu, Y. Tang, and W. L. Cong, “A review of mechanical drilling for composite laminates,” *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 4, pp. 1265–1279, Mar. 2012.
- [13] S. C. Lin and I. K. Chen, “Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed,” *Wear*, vol. 194, no. 1–2, pp. 156–162, Jun. 1996.

- [14] C. M. Machado, "Empirical Models for Quantification of Machining Damage in Composite Materials," Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [15] V. Krishnaraj, A. Prabukarthi, A. Ramanathan, N. Elanghovan, M. Senthil Kumar, R. Zitoune, and J. P. Davim, "Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 4, pp. 1791–1799, Jun. 2012.
- [16] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, and D. J. S. Gonçalves, "Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods," *Compos. Struct.*, vol. 96, pp. 576–583, Feb. 2013.
- [17] L. M. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, and A. T. Marques, "Comparative analysis of drills for composite laminates," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, pp. 1649–1659, 2014.
- [18] P. Vaara and J. Leinonen, "Technology Survey on NDT for Carbon-fiber Composites," Tornio University of Applied Sciences Series B, Finland, 2012.
- [19] H. Ho-Cheng and C. K. H. Dharan, "Delamination During Drilling in Composite Laminates," *J. Eng. Ind.*, vol. 112, no. 3, p. 236, 1990.
- [20] S.-L. Gao and J.-K. Kim, "Scanning acoustic microscopy as a tool for quantitative characterisation of damage in CFRPs," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 59, no. 3, pp. 345–354, Feb. 1999.
- [21] M. Petrou and C. Petrou, *Image Processing: the fundamentals*, 2ª Edição. Chichester, 2010.
- [22] G. Lo Re, F. Lopresti, G. Petrucci, and R. Scaffaro, "A facile method to determine pore size distribution in porous scaffold by using image processing," *Micron*, vol. 76, pp. 37–45, Sep. 2015.
- [23] C. Liu, B. Shi, J. Zhou, and C. Tang, "Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials," *Appl. Clay Sci.*, vol. 54, no. 1, pp. 97–106, Nov. 2011.
- [24] J. A. Glud, J. M. Dulieu-Barton, O. T. Thomsen, and L. C. T. Overgaard, "Automated counting of off-axis tunnelling cracks using digital image processing," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 125, pp. 80–89, Mar. 2016.
- [25] J. Perlo, C. Mülder, E. Danieli, C. Hopmann, B. Blümich, and F. Casanova, "Digital processing of images of extruded rubber profiles for process control MRI," *Measurement*, vol. 82, pp. 466–475, Mar. 2016.
- [26] B. M. Mehtre, M. S. Kankanhalli, and Wing Foon Lee, "Shape measures for content based image retrieval: A comparison," *Inf. Process. Manag.*, vol. 33, no. 3, pp. 319–337, May 1997.
- [27] G. Doretto and Y. Yao, "Region Moments: Fast invariant descriptors for detecting small image structures," in *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on*, 2010, pp. 3019–3026.
- [28] E. Sokic and S. Konjicija, "Phase preserving Fourier descriptor for shape-based image retrieval," *Signal Process. Image Commun.*, vol. 40, pp. 82–96, Jan. 2016.

- [29] M. M. Bronstein and I. Kokkinos, "Scale-invariant heat kernel signatures for non-rigid shape recognition," in *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on*, 2010, pp. 1704–1711.
- [30] J. Sun, M. Ovsjanikov, and L. Guibas, "A Concise and Provably Informative Multi-Scale Signature Based on Heat Diffusion," in *Computer graphics forum*, 2009, vol. 28, pp. 1383–1392.
- [31] X. Ni, M. Garland, and J. C. Hart, "Fair morse functions for extracting the topological structure of a surface mesh," in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2004, vol. 23, pp. 613–622.
- [32] R. M. Rustamov, "Laplace-Beltrami Eigenfunctions for Deformation Invariant Shape Representation," *Eurographics Symp. Geom. Process.*, 2007.
- [33] F. P. Beer and E. R. Johnston Jr., *Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática*, 6ª Edição. Portugal: McGraw-Hill, 1998.

% Rotina principal

% Função para criação da tabela de resultados

function [otsu_level, otsu_255, A, V1, V2, D1, D2] = Delamination()

load('furos_data.mat');

run_dir = 'D:\Methodology\Imagens\';

[otsu_level, otsu_255, raw, str_bw, BW, drill_fi, constant, A, index] = otsu_calc();

[radius_classic, affected_area, V1, V2, D1, D2, Eccentricity] =
hough_processing(raw,str_bw,drill_fi,constant,A);

mm_radius_classic = radius_classic*18.5*1e-3;

affected_area = affected_area*(18.5*1e-3)^2;

enclosing_area_classic = pi*mm_radius_classic^2;

enclosing_diameter_classic = 2*mm_radius_classic;

fd_classic = enclosing_diameter_classic/furos_data.Tool_dia_mm(index);

E = Eccentricity;

furos_data.ref(index,1) = {str_bw};

furos_data.threshold(index,1) = otsu_255;

furos_data.affected_area(index,1) = affected_area;

furos_data.enclosing_area_classic(index,1) = enclosing_area_classic;

furos_data.enclosing_diameter_classic(index,1) = enclosing_diameter_classic;

furos_data.Eccentricity(index,1) = E;

save('furos_data.mat','furos_data');

end

% Função para aplicação do método de Otsu (*Threshold*)

```
function [otsu_level, otsu_255, raw, str_bw, BW, drill-fi, constant, A, index] = otsu_calc()

load('furos_data.mat');
run_dir = 'D:\Methodology\Imagens\';

C1 = [1];
C1S = [1];
constant = 0.99;

otsu_level = zeros(1,length(C1));
otsu_255 = zeros(1,length(C1));
for j = 1 : length(C1)
    if C1(j)<10 && C1S(j) == 0
        str_raw = strcat(run_dir,'A','_V',num2str(C1(j)),'.tif');
    elseif C1(j) < 10 && C1S(j) ~= 0
        str_raw = strcat(run_dir,'A',num2str(C1S(j)),'_V',num2str(C1(j)),'.tif');
    else
        str_raw = strcat(run_dir,'A',num2str(C1S(j)),'_V',num2str(C1(j)),'.tif');
    end

    raw = imread(str_raw);
    otsu_level(j) = graythresh(raw);
    otsu_255(j) = otsu_level(j)*255;

    BW = im2uint8(im2bw(raw,otsu_level(j)));

    if C1(j) < 10 && C1S(j) == 0
        str_bw = strcat('A','_V',num2str(C1(j)),'_BW_',num2str(round(otsu_255(j))),'.tif');
    else
        str_bw=strcat('A',num2str(C1S(j)),'_V',num2str(C1(j)),'_BW_',num2str(round(otsu_255(j))),'.tif');
    end
end
```

```
str_bw = strcat(run_dir,str_bw);  
imwrite(BW,str_bw,'tiff');  
  
im = double(im2bw(BW));  
fid = ['BW1_' num2str(j) '.txt'];  
save(fid,'-ascii','im');  
A = load(fid);  
  
index = C1(j);  
drill_fi = furos_data.Tool_dia_mm(index);  
end
```

%% Metodologia de caracterização da delaminação

```

function [radius_classic, affected_area, V1, V2, D1, D2, Eccentricity] =
hough_processing(raw,pic,drill_fi, constant,A)

addpath ('D:\Program\MinBoundSuite\');

img_orig = imread(pic);
img_orig_tag = bwlabel(img_orig);
img_orig_props = regionprops(img_orig_tag, 'Area');
var2filter = [img_orig_props.Area];
[px_filter,~] = pixel_filter(var2filter,constant);
img = bwareaopen(img_orig, px_filter);

img_tag = bwlabel(img);
img_props = regionprops(img_tag,'Area', 'ConvexHull')
img_props1 = regionprops(img_tag, 'Eccentricity','Centroid')
img_props2 = regionprops(img_tag,'MajorAxisLength','MinorAxisLength','Extrema')
imshow (img_tag,'InitialMagnification','fit')

if numel(img_props) == 1
    affected_area = img_props(1).Area;
    [Y,X] = find(img == 1,1,'first');
    img_contour = bwtraceboundary(img,[Y, X], 'W', 8);
    boundary_X = img_contour(:,2);
    boundary_Y = img_contour(:,1);
    edge_points = img_props.ConvexHull;
    xx = edge_points(:,1);
    yy = edge_points(:,2);

    [c,radius] = minboundcircle(xx,yy);
    centre_X = c(1);
    centre_Y = c(2);

else % More than one shape
    warning('Multiple shapes identified -- Center was estimated. Make sure all shapes represent
interesting areas');
    affected_area = 0;

```

```

boundaries = cell2mat(bwboundaries(img_tag,'noholes'));
for looper = 1:numel(img_props)
    affected_area = affected_area + img_props(looper).Area;
    edge_points = img_props(looper).ConvexHull;
    if exist('xx') && exist('yy')
        xx = [xx; edge_points(:,1)];
        yy = [yy; edge_points(:,2)];
    else
        xx = edge_points(:,1);
        yy = edge_points(:,2);
    end
    end
    [c,radius] = minboundcircle(xx,yy);
    centre_X = c(1);
    centre_Y = c(2);

end

for i=1:218
    for j=1:800
        A(i,j)=0;
    end
end

for i=1:800
    for j=555:800
        A(i,j)=0;
    end
end

for i=1:800
    for j=1:150
        A(i,j)=0;
    end
end

centers = img_props1.Centroid;
diameters = mean ([img_props2.MajorAxisLength img_props2.MinorAxisLength],2);
Eccentricity = img_props1.Eccentricity

```

%% Metodologia de determinação do fator de delaminação clássico (Chen)

% DRILL CENTRE: DETERMINATION THROUGH THE HOUGH TRANSFORM

% Chen's Delamination Factor

addpath ('D:\Program\CircularHough_Grd\');

if drill_fi == 5

 radrange = **round**([2.30, 3.50] .* (1/18.5e-3));

elseif drill_fi == 7

 radrange = **round**([3.30, 4.55] .* (1/18.5e-3));

elseif drill_fi == 9

 radrange = **round**([4.40, 5.60] .* (1/18.5e-3));

end

raw_img = rgb2gray(raw);

[accum, circen, cirrad] = CircularHough_Grd (raw_img, radrange, 10, 70);

drill_centre_X = circen(1,1)

drill_centre_Y = circen(1,2)

drill_radius = cirrad; % Experimental drill radius

if numel(img_props) == 1

 dist2drill_centre = **zeros**(**length**(img_contour),1);

for i = 1:**length**(img_contour)

 dist2drill_centre(i) = hypot((drill_centre_X-boundary_X(i)),(drill_centre_Y-boundary_Y(i)));

end

 radius2drill_centre = **max**(dist2drill_centre);

else

 dist2drill_centre = **zeros**(**length**(boundaries), 1);

for i=1:**length**(boundaries)

 dist2drill_centre(i) = hypot((drill_centre_X - boundaries(i,2)),(drill_centre_Y - boundaries(i,1)));

end

 radius2drill_centre = **max**(dist2drill_centre);

end

lx = 0;

for j=1:800

for i=1:800

 lx = lx+(drill_centre_Y-j)^2*A(i,j);

end

end

```

ly = 0;
for j=1:1:800
    for i=1:800
        ly = ly+(drill_centre_X-i)^2*A(i,j);
    end
end

Pxy = 0;
for j=1:1:800
    for i=1:800
        Pxy = Pxy+(drill_centre_X-i)*(drill_centre_Y-j)*A(i,j);
    end
end

B = [lx,-Pxy;-Pxy,ly]
[V,D] = eig(B)
V1 = V(:,1);
V2 = V(:,2);

D1 = D(1,1);
D2 = D(2,2);
l1 = D1/(D1+D2);
l2 = D2/(D1+D2);
X1 = V1(1,1)*(max(l1,l2)*500)+drill_centre_X;
Y1 = V1(2,1)*(max(l1,l2)*500)+drill_centre_Y;
X2 = V2(1,1)*(l1*500)+drill_centre_X;
Y2 = V2(2,1)*(l1*500)+drill_centre_Y;

P0 = [drill_centre_X,drill_centre_Y];
P1 = [Y1,X1];
P2 = [Y2,X2];

Zd = zeros(800,800);
for i=1:800
    for j=1:800
        Dx = (drill_centre_X-i)*A(i,j);
        Dy = (drill_centre_Y-j)*A(i,j);
        Zd(i,j) = sqrt(Dx^2+Dy^2);
    end
end

```



```

Md = max(Zd(:))
for i=1:800
    for j=1:800
        if Zd(i,j) == Md
            Xm = i
            Ym = j
        end
    end
end
Ex = [Ym,Xm];

%% Representação gráfica das áreas circunscritas da delaminação
%% HOUGH TRANSFORM PLOTS
addpath ('D:\Methodology\results\');
enc_areas = figure(1);
imshow (img,'InitialMagnification',50);
theta = [linspace(0,2*pi) 0];

% CLASSIC DELAMINATION
hold on
centre_classic = plot(drill_centre_X,drill_centre_Y,'color',[.4 .8 0],'Marker','*');
radius_classic = plot(cos(theta)*radius2drill_centre+drill_centre_X,...
    sin(theta)*radius2drill_centre+drill_centre_Y,'Color',[.4 .8 0],...
    'LineWidth', 2);
%max_point = plot(Y,'color',[.4 .8 0],'Marker','*');
plot_lg = legend([radius_classic],'Dmax (Chen)','Location','NorthEast');
if size(raw) == 600
    font_size = 6;
elseif size(raw) == 800
    font_size = 8;
else
    font_size = 9;
end
set(plot_lg,'Box','off','Color',[0 0 0],'TextColor',[1 1 1],'FontSize',font_size);

centre_classic = plot(drill_centre_X,drill_centre_Y,'color',[.4 .8 0],'Marker','*');
radius_classic =
plot(cos(theta)*radius2drill_centre+drill_centre_X,sin(theta)*radius2drill_centre+drill_centre_Y,'Col
or',[.4 .8 0],'LineWidth', 2);
plot_lg = legend([radius_classic],'Dmax (Chen)','Location','NorthEast');

```

```

if size(raw) == 600
    font_size = 6;
elseif size(raw) == 800
    font_size = 8;
else
    font_size = 9;
end
set(plot_lg,'Box','off','Color',[0 0 0],'TextColor',[1 1 1],'FontSize',font_size);

% EIGENVECTORS AND EXTREME POINT
vectarrow(P0,P1);
hold on;
vectarrowR(P0,P2);
hold on;
vectarrowG(P0,Ex);

% EXPORT FIGURE
pic_name = textscan(pic,'%*s %*s %s','delimiter','.' '\');
str = char(pic_name{1});
format = strcat('D:\Methodology\results\fd_plot_',str,'.png');
export_fig (format, '-native');

imwrite (enc_areas,strcat('D:\Methodology\results\fd_plot_',char(pic_name{1}),'.png'),'png');
end

```